

Trabajo Fin de Máster

Diseño Avanzado en la Ingeniería Mecánica

Simulación del proceso de sinterización por corriente eléctrica mediante Comsol Multiphysics

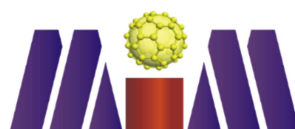
Autor: Francisco Javier De La Viña Reina

Tutores: Juan Manuel Montes Martos

Jesús Cintas Físico

Dpto. Ingeniería y Ciencia de los Materiales y del Transporte
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2017



Trabajo Fin de Máster
Diseño Avanzado en la Ingeniería Mecánica

Simulación del proceso de sinterización por corriente eléctrica mediante Comsol Multiphysics

Autor:

Francisco Javier De La Viña Reina

Tutores:

Juan Manuel Montes Martos

Jesús Cintas Físico

Profesores Titulares de Universidad

Dpto. Ingeniería y Ciencia de los Materiales y del Transporte

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2017

Proyecto Fin de Máster: Simulación del proceso de sinterización por corriente eléctrica mediante Comsol Multiphysics

Autor: Francisco Javier De La Viña Reina

Tutor: Juan Manuel Montes Martos
Jesús Cintas Físico

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2017

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis maestros

Agradecimientos

Agradecer lo conseguido hasta ahora a mi familia, especialmente a mis padres y abuelos. Sin su apoyo durante el transcurso del Máster no lo hubiera conseguido. También quisiera agradecer a Laura todo el apoyo que me ha dado desde que la conocí y la enorme paciencia que ha tenido para aguantar las horas de dedicación que se requiere para terminar unos estudios universitarios, sin su apoyo nada saldría igual. Asimismo quisiera dar las gracias a dos profesores, Emilio y Ángeles, mis profesores de matemáticas y física de Bachillerato quienes con sus clases y manera de ser, me ayudaron a seguir estudiando e hicieron que finalmente me inclinase hacia el mundo ingenieril. A Juan Manuel y Jesús, tutores del presente proyecto, quienes gracias a su dedicación, compromiso, paciencia, conocimientos y sobre todo, pasión por su área de conocimiento, crean un entorno de trabajo y de intercambio de conocimientos óptimos.

Francisco Javier De La Viña Reina

Sevilla, 2017

Resumen

En esta memoria del Trabajo Fin de Máster se describe el proceso seguido para la implementación de un modelo del proceso de sinterización por corriente eléctrica mediante el paquete comercial de elementos finitos Comsol Multiphysics. En esta memoria se describe el modelo, su implementación en FEM y algunos resultados de interés deducidos a partir de simulaciones para un material de interés industrial para el sector de herramientas de metal duro. El trabajo se completa con la elaboración de una interfaz gráfica amigable que persigue facilitar la optimización de las tareas de obtención de resultados y de cambios paramétricos destinados a la búsqueda y localización de las condiciones óptimas de procesado.

Este trabajo consta de las siguientes partes. En primer lugar, se presenta una visión general de la pulvimetalurgia y de las distintas técnicas de consolidación eléctrica. Esta introducción se concreta con una visión general y estratégica del campo de los metales duros, materiales que servirán de ejemplo en este trabajo. Se sigue con una descripción sobre el paquete de elementos finitos COMSOL Multiphysics®, y de sus principales virtudes que han motivado su elección. Posteriormente, se describe un primer modelo del proceso de sinterización por resistencia eléctrica y de los principales aspectos relacionados con su implementación en el paquete de FEM elegido. Se describe la interfaz de usuario desarrollada para facilitar los cambios paramétricos y condiciones de ensayo. Se analizan y discuten algunos resultados arrojados por el simulador aplicado sobre polvo de metal duro (WC-Co). Finalmente, se plantean las principales conclusiones obtenidas de este trabajo.

Abstract

This Master's Project deals with the implementation of an electric current sintering model using Comsol Multiphysics® software. This report contains the entire process followed for the creation of the FEM model and some results of applying this model to hard metals parts production. A friendly graphical interface developed, as a part of this project, to help with the modification of the starting data, and results optimization. This report is structured in different chapters. Firstly, the introduction presents an overview of powder metallurgy and sintering by electric current, and one of its direct applications: hard metals. The next chapter describes the COMSOL Multiphysics® finite element package. Later, the sintering process and the mathematical model proposed for the subsequent implementation in the software are described. Finally, some of the results obtained with the graphical interface created are shown, the results are discussed, and the main conclusions are detailed.

Índice

Agradecimientos	vii
Resumen	ix
Abstract	xi
Índice	xii
Índice de Figuras	xv
Índice de Tablas	xix
1 Introducción	1
1.1 Una visión general de la pulvimetalurgia	1
1.2 La Sinterización por Resistencia Eléctrica y otras técnicas FAST	1
1.3 Metales duros	3
1.4 COMSOL Multiphysics®	5
1.5 Objetivo del trabajo	6
2 Modelo e implementación en Comsol	11
2.1 Breve descripción del proceso a modelar	11
2.2 Modelado del proceso	12
2.4 Implementación en Comsol Multiphysics	17
2.4.1. Geometría	17
2.4.2. Problema de contacto	18
2.4.3. Mallado	18
2.4.4. Módulos multifísica	21
2.4.5. Resolución	23
2.5. Interfaz del simulador de S.R.E.	24
3 Resultados y discusión	32
3.1. Datos del caso a simular	32
3.4. Influencia del tiempo de calentamiento	39
3.5. Influencia de la intensidad de corriente	40
3.6. Influencia de la presión	41
3.7. Influencia del material del tubo cerámico	43
4 Conclusiones	45
Anexo	47
Referencias	70

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Comportamiento de las grietas de Griffith para diferentes tamaños de granos	4
Figura 1.2. Dureza en función del tamaño de grano.	4
Figura 1.3. (a) Tenacidad a fractura en función del tamaño de grano y (b) su curva teórica.	5
Figura 2.1. Matriz y punzones empleados en el proceso de S.R.E.	11
Figura 2.2. Secuencia típica del proceso S.R.E.	12
Figura 2.3. Campana de Gauss.	13
Figura 2.4. Estructura de entradas y salidas.	16
Figura 2.5. Acoplamiento entre físicas.	16
Figura 2.6. Geometría en Comsol Multiphysics.	17
Figura 2.7. Mallado del modelo. Detalle general.	19
Figura 2.8. Mallado del modelo. Detalle masa de polvo y tubo cerámico.	19
Figura 2.9. Mallado del modelo. Detalle del punzón inferior, tubo cerámico y zuncho.	20
Figura 2.10. Mallado del modelo. Detalle del punzón superior con su base.	20
Figura 2.11. Malla deformada.	21
Figura 2.12. Estructura del resolvidor segregado y las físicas involucradas.	23
Figura 2.13. Vista general de la interfaz.	24
Figura 2.14. Geometría actual del sistema.	25
Figura 2.15. Introducción de parámetros que describen la geometría del sistema.	25
Figura 2.16. Entrada de parámetros para la obtención de la porosidad inicial.	25
Figura 2.17. Entrada de parámetros físicos del modelo.	26
Figura 2.18. Entrada de las propiedades del material del polvo.	26
Figura 2.19. Entrada de las propiedades del material de los punzones.	27
Figura 2.20. Entrada de las propiedades del material de las obleas.	27
Figura 2.21. Entrada de las propiedades del material del tubo cilíndrico.	27
Figura 2.22. Entrada de las propiedades de la corriente.	28
Figura 2.23. Ejemplo de un perfil de corriente.	28
Figura 2.24. Temperatura media a lo largo del tiempo.	29
Figura 2.25. Porosidad media a lo largo del tiempo.	29
Figura 2.26. Perfil de porosidad en la masa de polvo a lo largo del tiempo.	30
Figura 2.27. STE a lo largo del tiempo.	30
Figura 2.28. Perfil de temperaturas en el sistema a lo largo del tiempo.	31
Figura 2.29. Exportación en forma de tabla de los resultados.	31
Figura 3.1. Forma del perfil propuesto para la intensidad de corriente.	32
Figura 3.2. Sensibilidad de la malla en temperatura.	33

Figura 3.3. Sensibilidad de la malla en porosidad.	34
Figura 3.4. Comparativa de las curvas simuladas y adquiridas experimentalmente. Las curvas azules son las correspondientes a la experiencia 1, la de optimización; las curvas rojas corresponden a la experiencia 2. Las curvas a trazos son las obtenidas mediante simulación; las continuas representan las curvas adquiridas experimentalmente.	35
Figura 3.5. Mapa de distribución de temperaturas.	36
Figura 3.6. Mapa de distribución de porosidades.	37
Figura 3.7. Densidad de corriente en dirección horizontal.	37
Figura 3.8. Densidad de corriente en dirección vertical.	38
Figura 3.9. Sección diametral de un compacto consolidado eléctricamente con baja intensidad de corriente (6 kA) y tiempo de calentamiento de 500 ms. Los puntos numerados indican zonas donde se practicaron medidas de dureza para correlacionar con la porosidad.	38
Figura 3.10. Temperatura media con diferentes tiempos de calentamiento.	39
Figura 3.11. Porosidad media para diferentes tiempos de calentamiento.	40
Figura 3.12. Temperatura media para diferentes valores de la intensidad de corriente.	40
Figura 3.13. Porosidad media para diferentes valores de la intensidad de corriente.	41
Figura 3.14. Temperatura media para diferentes valores de presión.	42
Figura 3.15. Porosidad media para diferentes valores de presión.	42
Ilustración 3.16. Temperatura media Alúmina-Sialón.	43
Figura 3.17. Porosidad media Alúmina-Sialón.	44
Figura 5.0.1. Gráfico de conductividad térmica en las obleas.	47
Figura 0.2. Gráfico del coeficiente de expansión térmica en las obleas.	48
Figura 5.0.3. Gráfica del calor específico en las obleas.	49
Figura 5.0.4. Gráfica de la resistividad eléctrica de las obleas.	50
Figura 5.0.5. Gráfica de la densidad de las obleas.	51
Figura 5.0.6. Gráfica del módulo de Young en las obleas.	51
Figura 5.0.7. Gráfica de la conductividad térmica en los punzones.	52
Figura. 5.0.8. Gráfica del calor específico en los punzones.	53
Figura 5.0.9. Gráfica de la resistividad eléctrica de los punzones.	54
Figura 5.0.10. Gráfica de la densidad de los punzones.	55
Figura 5.0.11. Gráfica de la conductividad térmica de la alúmina.	55
Figura 5.0.12. Gráfica del calor específico de la alúmina.	56
Ilustración 5.0.13. Gráfica de la conductividad térmica del aro metálico.	57
Figura 5.0.14. Gráfica del coeficiente de dilatación térmica del aro.	58
Figura 5.0.15. Gráfica del calor específico del aro.	59
Figura 5.0.16. Gráfica de la conductividad eléctrica del aro.	59
Figura 5.0.17. Gráfica de la densidad del aro.	60
Figura 5.0.18. Gráfica del módulo de Young del aro.	61
Figura 5.0.19. Gráfica del coeficiente de Poison del aro.	61
Figura 5.0.20. Gráfica de la conductividad térmica del polvo WC6Co.	63

Figura 5.0.21. Gráfica del calor específico sin calores latentes del polvo.	66
Figura 5.0.22. Gráfica del calor específico con los calores latentes incorporados del polvo.	66
Figura 0.23. Gráfica de resistividad eléctrica del polvo.	68
Figura 0.24. Gráfica de densidad del polvo.	69

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Datos geométricos del sistema empleados en las simulaciones de pruebas.	33
Tabla 3.2. Datos de entrada modificados.	43
Tabla 5.1. Conductividad térmica de las obleas.	47
Tabla 5.2. Tabla del calor específico de las obleas.	48
Tabla 5.3. Tabla de resistividad eléctrica de las obleas.	49
Tabla 5.4. Tabla de la densidad de las obleas.	50
Tabla 5.5. Conductividad térmica de los punzones.	52
Tabla 5.6. Calor específico de los punzones.	53
Tabla 5.7. Tabla de la resistividad eléctrica de los punzones.	53
Tabla 5.8. Densidad de los punzones.	54
Tabla 5.9. Conductividad térmica de la alúmina.	55
Tabla 5.10. Tabla de conductividad térmica del polvo WC6Co.	62
Tabla 5.11. Tabla de calores latentes del polvo WC6Co.	64
Tabla 5.12. Tabla de calor específico del polvo WC6Co.	64
Tabla 5.13. Tabla de resistividad eléctrica del polvo WC6Co.	67
Tabla 5.14. Tabla de densidad del polvo WC6Co.	69

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Una visión general de la pulvimetalurgia

Desde la Antigüedad las técnicas metalúrgicas han suscitado gran interés. De hecho, diversos principios pulvimetalúrgicos (P/M) eran usados mucho antes de que la Ingeniería fuese capaz de alcanzar el punto de fusión de los metales mediante el uso de hornos. Incluso los Egipcios (hacia el 3000 a.C.) usaban “hierro esponjoso” para la fabricación de herramientas.

Los procesos P/M son procesos de fabricación que combinan las características propias de la tecnología del conformado de polvos de compactación con el desarrollo del material y sus propiedades inherentes (físicas y mecánicas) durante las fases de densificación o consolidación (sinterización o sinterizado). Reconocer la interrelación de estas propiedades durante el proceso de diseño es crucial porque un pequeño cambio en el proceso de fabricación puede conllevar un importante cambio en las propiedades y comportamiento final del material.

El mercado internacional de componentes P/M lleva creciendo ininterrumpidamente desde principios del siglo XXI. La producción de materiales pesados y componentes estructurales en 2011 fue de 14.8 €Bn y 7.28 €Bn respectivamente. Tradicionalmente, Europa ha liderado el mercado internacional de componentes pulvimetalúrgicos, especializándose en la fabricación de materiales pesados con un total de 17 900 toneladas en 2008, superando a China cuya producción fue de 15 900 toneladas. Sin embargo, desde 2009 China asumió el liderazgo del mercado de materiales pesados, dejando a Europa como el segundo productor mundial con una fabricación de 16 500 toneladas en 2011, muy lejos de las 21 000 toneladas producidas por China.

Analizando estos datos es necesario cambiar drásticamente los métodos de elaboración y mejorar las rutas de fabricación para hacer de Europa un buen competidor frente a los productores asiáticos y volver a liderar el mercado internacional de materiales pesados [1].

Actualmente, los procesos industriales P/M requieren de unos tiempos de procesamiento y un consumo de energía demasiados largos. Una nueva metodología denominada FAST (del inglés *Field Assisted Sintering Technologies*) ha surgido con el objetivo de crear nuevos procesos para producir componentes sinterizados mediante la aplicación de una corriente eléctrica externa. El nombre es un juego de palabras que busca enfatizar la principal característica de todos estos procesos: su rapidez. El uso de la corriente eléctrica acorta considerablemente los tiempos de sinterización, reduce el consumo energético e incluso convierte a este proceso en un excelente candidato para la sinterización de materiales metálicos nanoestructurados y otros materiales ingenieriles de reciente interés. Otras ventajas adicionales, también derivadas de su corta duración, es la no necesidad de emplear atmósferas protectoras, pues ciertas reacciones perniciosas, presentes en los procesos convencionales, sencillamente no tienen tiempo de producirse. No obstante, es necesario desarrollar y estudiar profundamente la tecnología FAST para poder llevarla a cabo bajo unas condiciones controladas, ya que presenta algunos inconvenientes para la producción industrial, por ejemplo, una baja productividad y un elevado coste de producción.

1.2. La Sinterización por Resistencia Eléctrica y otras técnicas FAST

El uso directo de la electricidad como vía para lograr la sinterización rápida de polvos metálicos fue sugerida repetidas veces a lo largo del siglo XX. En una patente de 1933, Taylor [2] realizó un primer intento de compactación de polvos metálicos haciendo pasar a través de ellos una corriente eléctrica. Utilizó para ello un dispositivo consistente en un tubo de vidrio, que contenía el polvo metálico, taponado, por encima y por debajo, por dos punzones. La técnica, concebida principalmente para el prensado en caliente de los carburos cementados, requería tiempos de sinterización inferiores al segundo y presiones muy bajas, que podían ser aplicadas mediante palancas.

En 1940, Jones [3] sugirió la utilización de una máquina de soldadura por puntos para lograr la sinterización. Esta idea fue aplicada por Cremer [4] a la compactación de polvos de cobre, latón, bronce y aluminio. El polvo era aislado de la matriz metálica por medio de un revestimiento aislante. Empleando una densidad de corriente de 62 kA/cm^2 y presiones de 70 a 140 MPa, se lograba la sinterización en tiempos de sólo 0.02 a 0.03 s.

En 1945 Ross [5] propuso una modificación del método anterior consistente en la utilización de corrientes y presiones que variaban gradualmente.

Hacia 1955, las interesantes ideas desarrolladas por Lenel [6] permitieron aplicar la sinterización eléctrica a polvos de níquel, cobalto, metales refractarios, molibdeno, titanio, zirconio y algunas de sus aleaciones, carburos cementados y otros cermets. Lenel denominó a la modalidad por él empleada: sinterización por resistencia eléctrica bajo presión (*Electrical Resistance Sintering under pressure, ERS*). La matriz consistía en un zuncho metálico partido que se ceñía sobre un tubo cerámico (alúmina). Los electrodos, compuestos, estaban formados por un cilindro de aleación de cobre y una oblea de metal refractario, en contacto directo con el polvo. Las presiones utilizadas variaron entre los 80 y los 155 MPa, y las densidades de corriente, en el rango de 11 a 19 kA/cm^2 . Lenel introdujo, además, la importante novedad de aplicar dos trenes de corriente; el primer tren aplicaba una tensión más elevada para provocar la ruptura de las resistencias de contacto, el segundo, disminuía la tensión para evitar la fusión del material.

Una variante de este método, que emplea matriz conductora de grafito, es la denominada sinterización por plasma (*Spark Plasma Sintering, SPS*), se basa en las descargas de chispas eléctricas entre las partículas de polvo para activar los gases que las rodean y promover así la creación de cuellos de unión entre ellas. Esta variante, introducida en la década de los 70, fue concebida como un proceso aplicable a polvos no conductores [7, 8] y ha demostrado ampliamente la viabilidad de la sinterización de polvos metálicos en un cortos intervalos de tiempo (de 5 a 30 minutos) [9, 10, 11].

Todos los métodos mencionados hasta aquí empleaban una fuente eléctrica de baja tensión y alta intensidad. Se han ideado, no obstante, otras técnicas que también utilizan la corriente eléctrica como medio directo de calentamiento, pero procedente de la descarga de un banco de condensadores. El método proporciona alta tensión y alta intensidad y se conoce con el nombre de consolidación por descarga eléctrica (*Electric Discharge Consolidation, EDC*). Saito y col. [12] comprobaron que los compactos prepresados sometidos a descarga mejoraban notablemente su densificación durante una posterior sinterización tradicional en horno. Emplearon para la descarga eléctrica un condensador de $60 \mu\text{F}$ cargado hasta 15 kV. Concluyeron que la mejora en la densificación se debía a que la descarga lograba eliminar las capas de óxido superficiales de las partículas metálicas. Las medidas de las resistencias eléctricas antes de la descarga (70Ω a 60 MPa) y tras la descarga (menor de 0.01Ω), así lo constataban.

Ya en la década de los 80, Al-Hassani y col. [13, 14, 15] realizaron un extenso trabajo sobre compactación de polvos metálicos por descarga de alta tensión y alta densidad de corriente procedente de un banco de condensadores. Observaron que el compacto de polvo, alojado en un tubo de vidrio, no quedaba pegado a las paredes como consecuencia de la poderosa fuerza magnética transitoria de constricción que se creaba por el paso de la corriente de alta frecuencia [16]. Pese a la importancia y extensión de estos trabajos, no se trataron los aspectos metalúrgicos del problema.

Un estudio metalúrgico de materiales compactados por disipación directa de energía eléctrica a través del espécimen de polvo fue realizado por Hara y Akechi [17] recuperando la técnica de Lenel (baja tensión, alta intensidad), pero sustituyendo el tubo de alúmina por mica. Los parámetros empleados en su compactación fueron: presión de 98 a 127 MPa, tensión de 2 a 5 V y corrientes continua y alterna durante un tiempo de 0.5 a 3 s. Concluyeron que con polvos de titanio se requería una presión mayor de 98 MPa para conseguir una densificación superior al 96%. Comprobaron que con el aumento de la potencia de entrada aumentaba la temperatura, la densificación, y mejoraba la resistencia a la tracción.

Los investigadores soviéticos también desarrollaron un extenso trabajo sobre diversas modalidades de sinterización eléctrica, fundamentalmente en el terreno experimental [18, 19, 20], pero también con algunas incursiones en el modelado teórico [21, 22, 23]. Desafortunadamente, una gran parte de estos trabajos, escritos en ruso, no están traducidos, lo que constituye, ciertamente, un factor limitante para su estudio. G.L. Burenkov y col. [24] estudiaron el empleo de materiales alternativos para los revestimientos de las matrices destinadas a la fabricación de carburos cementados de base Cu-Sn. Tales materiales debían sustituir a los costosos revestimientos cerámicos, empleados por Lenel, y a las matrices de grafito, empleadas por una gran mayoría

de investigadores. Proponían un excelente sustituto, barato, y que permitía una media de unos 10 ciclos de trabajo. Desgraciadamente, el material propuesto, un cemento-amianto, hoy día es un material proscrito. No obstante, su trabajo permite imaginar futuras vías de investigación ensayando materiales alternativos.

Si bien puede decirse que la línea de investigación soviética se extinguió a principios de la década de los noventa, coincidiendo con la caída de la Unión Soviética, la japonesa ha continuado hasta nuestros días, liderando en la actualidad la investigación sobre los múltiples usos de la electricidad como vía de sinterización. La línea de investigación japonesa se ha venido interesando por técnicas de sinterización de materiales composites que logren preservar la nanoestructura del polvo de partida. Para este propósito, una técnica especialmente rápida (como lo es cualquiera de las distintas modalidades de sinterización eléctrica) resulta de vital importancia. En esta dirección se desarrollan los recientes trabajos de Moriguchi y col. [25, 26], por citar algún ejemplo.

Resumiendo, aunque la terminología ha ido sufriendo pequeños cambios de matices a lo largo de los años, podemos concluir que, hoy día, se entiende que en la actualidad existen dos procesos que emplean matrices aislantes y requieren polvo conductor: el proceso ERS y el EDC.

El proceso de ERS consiste en la aplicación a bajo voltaje de una corriente de alta intensidad alterna o continua a través de una masa de polvo contenida en un molde de material eléctricamente aislante al mismo tiempo que se aplica la presión al polvo. En cambio, en el proceso EDC, la corriente eléctrica que atraviesa el polvo también es de alta intensidad, pero el voltaje puede alcanzar valores mucho más altos que los característicos del proceso ERS. Esta combinación de alta intensidad y alto o moderado voltaje se obtiene gracias a la liberación de energía almacenada en baterías de condensadores. El tiempo necesario para la consolidación del material puede ser extremadamente corto, apenas unos micro o milisegundos [1].

Aunque las tecnologías ERS y EDC son conocidas desde hace años [27,28] sólo han sido estudiadas en condiciones de laboratorio y nunca para una aplicación industrial. Por esta razón, existen limitaciones técnicas en el diseño y en la adecuación de la maquinaria industrial así como falta de homogeneidad en la fabricación de componentes de media y gran escala y reducida repetitividad debido al limitado control de la corriente eléctrica [29].

Hoy en día, la modalidad FAST más estudiada es la SPS, que ya tiene algunos ejemplos de uso en el campo industrial, por FCT [30], Sumimoto [31], y Dr. Fritsch [32] entre otros. A pesar de ello, la baja productividad junto con el elevado coste de la maquinaria ha supuesto un freno a la expansión de esta tecnología.

1.3. Metales duros

Desde su introducción en los años 20 del siglo pasado, los metales WC-Co continúan siendo los mejores materiales para las aplicaciones que exigen fuerte resistencia a un continuo proceso de desgaste y abrasión, elevada resistencia al choque térmico, al impacto y a la fatiga térmica y mecánica. Estas complejas condiciones las encontramos en los procesos de exploración y perforación de pozos de petróleo y gas de hasta 10 km de profundidad, en la construcción de túneles de grandes dimensiones (diámetros mayores de 50 m), mecanizado de materiales extremadamente duros y resistentes, operaciones con moldes y yunques de síntesis de diamante con una presión superior a 10 GPa, etc. Los metales duros WC-Co usados en trabajos de minería con frecuencia trabajan bajo extremos choques térmicos como resultado del enfriamiento de altas temperaturas (superiores a los 1400 °C) hasta alcanzar la temperatura ambiente. Recientemente, nuevas tecnologías y maquinaria han sido desarrolladas e implementadas, lo cual ha permitido trabajar a más velocidad y mayores tensiones, cargas por impacto y fatiga intensa. Bajo estas condiciones, los metales duros WC-Co convencionales trabajan por encima del límite de sus propiedades mecánicas y su rendimiento y durabilidad se han visto mermados.

Debido a estos inconvenientes con los metales duros, resulta necesario mejorar las combinaciones de resistencia a la fractura, dureza y resistencia al desgaste. Desafortunadamente, hasta el día de hoy, todos los intentos de mejora han fallado simultáneamente. En general, elevar la resistencia a la fractura o resistencia a rotura transversal sólo puede ser obtenida en detrimento de la dureza y resistencia al desgaste, y viceversa.

La resistencia de los metales duros WC-Co se debe a la resistencia de los granos de carburo, la resistencia superficial entre los contornos de granos carburos-carburo y los contornos entre los granos carburos y el aglomerante. En concreto, con materiales de grano fino WC-Co, se ha sabido que los granos gruesos son más

propensos a fracturar bajo la acción de cargas, lo cual reduce la resistencia del compuesto. Existe una tendencia general en la industria de los metales duros por fabricar metales duros WC-Co de tamaño de grano tan pequeño como sea posible con el fin de conseguir un mayor rango de nanomateriales. Recientemente se han llevado a cabo diferentes investigaciones al respecto desarrollando nano metales duros con un tamaño de grano WC de 100 nm o 200 nm. Algunas de estas publicaciones están resumidas en [33].

Uno de los avances más prometedores en cuanto a la mejora de las propiedades mecánicas y rendimiento de estos materiales se refiere es la nanoestructuración. El desarrollo e implementación de los materiales nanoestructurados ha producido cambios revolucionarios en muchos ámbitos de la industria tales como nuevas e inusuales propiedades de materiales convencionales no factibles hasta el momento. En el campo de los metales duros, se cree que la aparición de nuevas propiedades está relacionada con el comportamiento de las grietas Griffith al entrar en la región de los nanomateriales, lo cual se muestra en la figura 1.1[34].

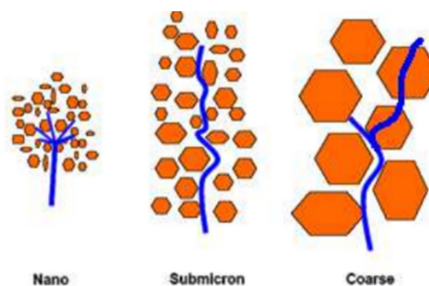


Figura 1.1. Comportamiento de las grietas de Griffith para diferentes tamaños de granos

En la Fig. 1.1 se ha querido representar cómo al romper los metales duros con varios tamaños de granos WC, las grietas se propagan por los contornos de los granos WC, dejando el aglomerante alrededor de los granos WC. Dado que se requiere mucha energía para la propagación de las grietas y la probabilidad de que la grieta se pare en la superficie de los granos WC de mayor tamaño o en densas entrecapas de aglomerante es muy alta, resulta de todo ello que la resistencia a la fractura es también muy elevada. Cuando disminuimos el tamaño de los granos WC, el principio de la fractura y su propagación se vuelve relativamente fácil ya que la grieta atraviesa los granos finos con un consumo energético menor y, por consiguiente, la resistencia a la fractura disminuye también. Cuando el tamaño de los granos WC se reduce aún más hasta llegar a un tamaño de 100 nm, las grietas Griffiths llegan a ser comparables con el tamaño de grano. En este caso, la grieta puede ser dividida en numerosas sub-grietas con su consecuente disminución en el volumen del nanomaterial. Se considera que esto provoca un dramático incremento en la dureza [35] y resistencia a la fractura del metal duro nanoestructurado (ver figuras 1.2 y 1.3).

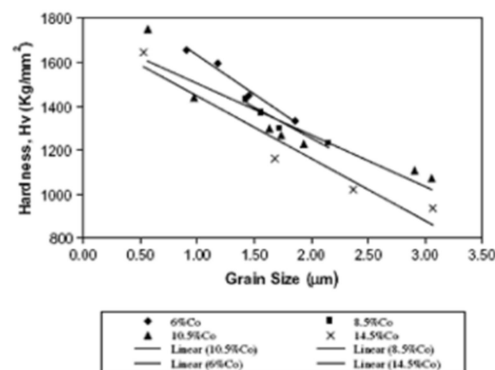


Figura 1.2. Dureza en función del tamaño de grano.

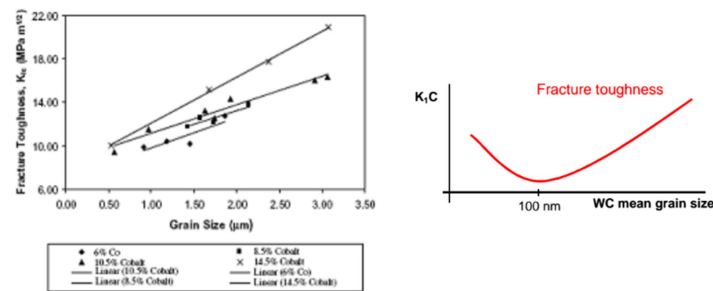


Figura 1.3. (a) Tenacidad a fractura en función del tamaño de grano y (b) su curva teórica.

El problema principal del procesamiento de metales duros nanoestructurados es lograr la preservación del carácter nanoestructurado de los polvos de partida. Algunos intentos han sido publicados, con sinterización por plasma (SPS) o el uso de inhibidores del crecimiento del grano [36, 37], pero el asunto sigue constituyendo un reto.

Uno de los principales objetivos del proyecto EFFIPRO, el proyecto europeo en el que se enmarca este trabajo, consiste en desarrollar la tecnología de sinterización eléctrica capaz de desarrollar metales duros nanoestructurados. Más concretamente, se persigue obtener metales duros de un tamaño de grano de 100 nm o menor (Ver figura 1.4). La tecnología de consolidación eléctrica a emplear es la y conocida ERS, pero mejorada con la actual tecnología de media frecuencia. Como se verá algo más adelante, el propósito de este trabajo es profundizar en el modelado y simulación del proceso de ERS, que permita un mejor control y conocimiento del mismo.

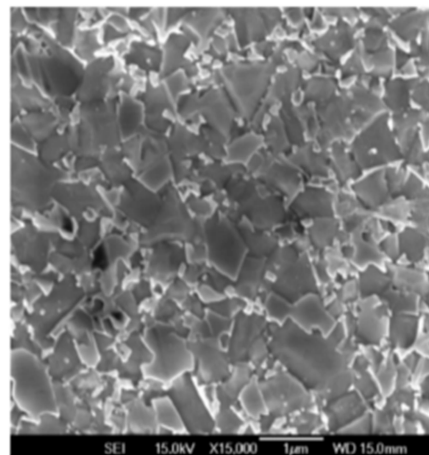


Figura 1.4. Imagen FE-SEM de WC-Co nanoestructurado.

1.4. COMSOL Multiphysics®

COMSOL Multiphysics® es un *software* de propósito general basado en métodos numéricos avanzados para modelar y simular todo tipo de problemas físicos e ingenieriles. Con COMSOL Multiphysics® se puede acoplar fenómenos multifísicos ya que tiene interfaces dedicadas a cada física como pueden ser: corrientes eléctricas, mecánica de sólidos, mecánica de fluidos y aplicaciones químicas.

Unas de las principales virtudes de COMSOL Multiphysics® frente a otros softwares de elementos finitos es el módulo multifísica. Este módulo, cuyo objetivo es combinar diferentes físicas (electricidad, electromagnetismo, mecánica, transmisión de calor, ecuaciones diferenciales, etc) es óptimo para el sistema que se quiere resolver ya que presenta un fuerte acoplamiento entre las físicas que lo componen (mecánica de sólidos, transmisión de calor, corrientes eléctricas) y también propiedades no lineales en los materiales (resistividad, calor específico, etc).

Se entiende que es necesario tener un control exhaustivo de tolerancias, algoritmos, parámetros de los resolvers, orden de resolución de físicas, etc. COMSOL Multiphysics® presume, frente a otros paquetes de

elementos finitos, de transparencia en la implementación y modelado de sistemas multifísicos ya que la interacción entre físicas se hace de una manera muy clara e intuitiva, y los posibles errores, así como las comprobaciones que son necesarias para validar el modelo bajo estudio (tolerancias, parámetros resolutores, etc) se vuelven más fáciles de realizar. Por otro lado, la interfaz gráfica de COMSOL Multiphysics® es muy amigable haciendo muy sencillo el modelaje de cualquier sistema así como la obtención de resultados en forma de gráficos, tablas, archivos exportables, etc.

Por todas estas razones, se ha elegido este paquete de FEM para realizar el modelo del sistema bajo estudio.

1.5. Objetivo del trabajo

El objetivo del presente trabajo Fin de Máster es la realización de un modelo y su implementación con el paquete de elementos finitos COMSOL Multiphysics® del proceso de sinterización por resistencia eléctrica (ERS), con versatilidad para diferentes geometrías y materiales involucrados, que sirva de entrenador y selector de condiciones óptimas para la industria. El simulador se aplicará a un proceso con claro interés industrial: la fabricación de piezas de carburo cementado, destinadas a herramientas de corte. El trabajo se completa con un interfaz amigable, que permita de forma sencilla el cambio de propiedades de los materiales, y algunos elementos de su geometría.

2 MODELO E IMPLEMENTACIÓN EN COMSOL

2.1. Breve descripción del proceso a modelar

El sistema bajo estudio consiste en una columna de polvo contenida en un tubo cerámico, rodeado de zuncho de metal, taponado por arriba y por abajo con sendos punzones (con dos obleas en contacto directo con el polvo). El sistema se muestra gráficamente en la Figura 2.1.

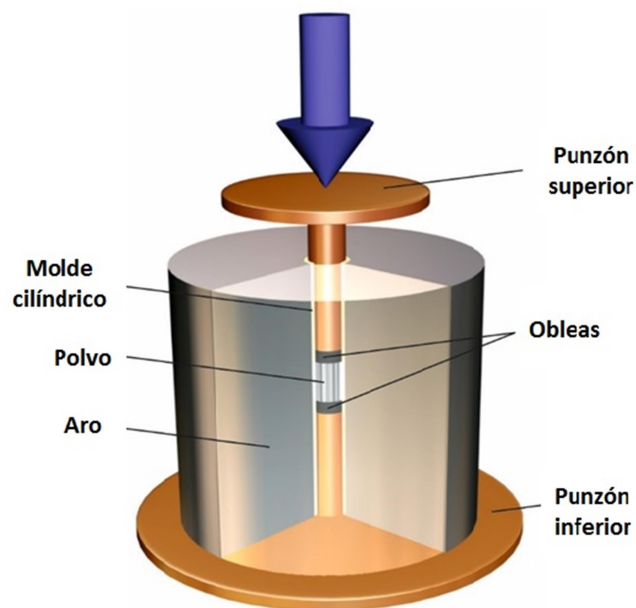


Figura 2.1. Matriz y punzones empleados en el proceso de S.R.E.

Con respecto a los materiales que componen el sistema, el material de los punzones y obleas deben ser capaces de resistir altas temperaturas ya que están en contacto directo con el polvo. Estos tipos de materiales deben exhibir una conductividad térmica relativamente baja sin un notable incremento de sus resistencias eléctrica. Si el material con alta conductividad térmica, como el usado en los punzones, estuviera en contacto directo con el polvo, la cantidad de calor evacuado por las superficies de la masa de polvo en contacto con éstos, impediría conseguir temperaturas suficientemente altas en el polvo. Es requerida también una baja resistividad eléctrica ya que la corriente eléctrica que circula a través del sistema no puede ser drásticamente limitada y también, una baja resistividad eléctrica que asegure que la masa de polvo es calentada correctamente.

Otro aspecto a considerar en el modelo es que la secuencia típica del proceso S.R.E. Se inicia con un periodo de *compactación en frío* (*cold compaction*) durante el cual no pasa corriente eléctrica a través del polvo, pero sí se ejerce presión constante sobre éste. Una vez se terminado, comienza una etapa de *compactación en caliente* (*hot pressing*) durante la cual la presión se mantiene constante, y el sistema es recorrido por la corriente eléctrica de valor fijado. Finalmente, el proceso termina con la *etapa de enfriamiento o forja* (*cooling stage*), en la que se mantiene aplicada la presión, pero cesa la corriente, de modo que el compacto se enfría bajo presión. La figura 2.2 describe gráficamente la sucesión de etapas.



Figura 2.2. Secuencia típica del proceso S.R.E.

La descripción del proceso de S.R.E. requiere el estudio de la transferencia de energía térmica generada por el paso de corriente eléctrica a través del sistema, así como el problema asociado con la densificación del sistema (téngase en cuenta que el polvo situado entre los electrodos puede ver reducida su porosidad por efecto de la presión aplicada y del calor generado). Esta reducción de porosidad se traduce en un fuerte acoplamiento entre dos problemas físicos: el de la transferencia de calor y el de su comportamiento mecánico. Ello es así debido a que las propiedades (eléctricas, térmicas, mecánicas) del polvo dependen de la porosidad y de la temperatura, es decir, las propiedades del polvo dependen de dos variables.

Dicho esto, en la resolución del modelo se debe obtener variables tales como la evolución y distribución de temperaturas y de porosidades, y otras variables como resistencia eléctrica, energía térmica específica generada, etc.

2.2. Modelado del proceso

Para realizar la simulación, hay que fijar algunas suposiciones (o hipótesis de trabajo) que permiten simplificar (o acotar) el problema. Las principales son estas:

- Todos los materiales se consideran elásticos y lineales
- La temperatura inicial del sistema completo es T_0
- La variación con respecto al tiempo de la intensidad de corriente que recorre el sistema es como sigue:

$$I(t) = \begin{cases} 0 & \text{si } 0 \leq t \leq t_0 \\ I_0 \left(\frac{t - t_0}{t_S - t_0} \right) & \text{si } t_0 \leq t \leq t_S \\ I_0 & \text{si } t_S \leq t \leq t_C \\ I_0 \left(\frac{t - t_0}{t_S - t_0} \right) & \text{si } t_C \leq t \leq t_R \\ 0 & \text{si } t_R \leq t \leq t_F \end{cases} \quad (1)$$

donde t_0 representa el fin del periodo de compactación en frío, t_S el tiempo inicial en el que la intensidad es se vuelve constante, t_C el momento en el que la intensidad empieza a bajar, t_R el tiempo en el que la intensidad es cero y t_F el fin de la simulación.

- La fuerza ejercida por los punzones se considera constante durante todo el proceso.
- Las bases de los punzones están enfriados de tal forma que permanecen a una temperatura constante T_p durante todo el proceso.
- Las propiedades de los materiales involucrados varían con la temperatura y, además, las propiedades de la masa de polvo, varían en general con la porosidad. Esto es,

$$X_{material} = X_{material}(T(t)) \quad (2a)$$

$$X_{polvo} = X_{polvo}(T(t), \theta(t)) \quad (2b)$$

donde X presenta cualquier propiedad, $T(t)$ la temperatura en el instante t y $\theta(t)$ la porosidad en el instante t .

Las propiedades involucradas de cada material que compone el sistema son el módulo de Young (E), el coeficiente de Poisson (ν), el coeficiente de dilatación térmica (α_t), la densidad (d), la conductividad térmica (k), el calor específico (c_m) y la conductividad eléctrica (ρ).

Los valores y dependencias con la temperatura de estas propiedades para los materiales macizos deben de ser conocidas y pueden encontrarse en el Anexo.

El calor específico merece una mención especial debido a las posibles transformaciones de fase que se pueden producirse durante el proceso. La forma elegida para incluir su efecto es

$$c_m(T) = c'_m(T) + \sum_i G(T, T_i) L_i \quad (3)$$

donde L_i es el calor latente i a la temperatura T_i , c'_m es el calor específico sin considerar el calor latente y la función $G(T, T_i)$ es la función de Gauss que en este caso se presenta de la siguiente forma,

$$G(T, T_i) = \exp\left(-\frac{\left(\frac{T - T_i}{Sem}\right)^2}{Sem * \pi^2}\right) \quad (4)$$

siendo Sem es un parámetro que controla el ancho de la curva. A modo de ejemplo se puede ver la forma que adquiere para el caso concreto de $Sem = 20$ (Fig. 2.3).

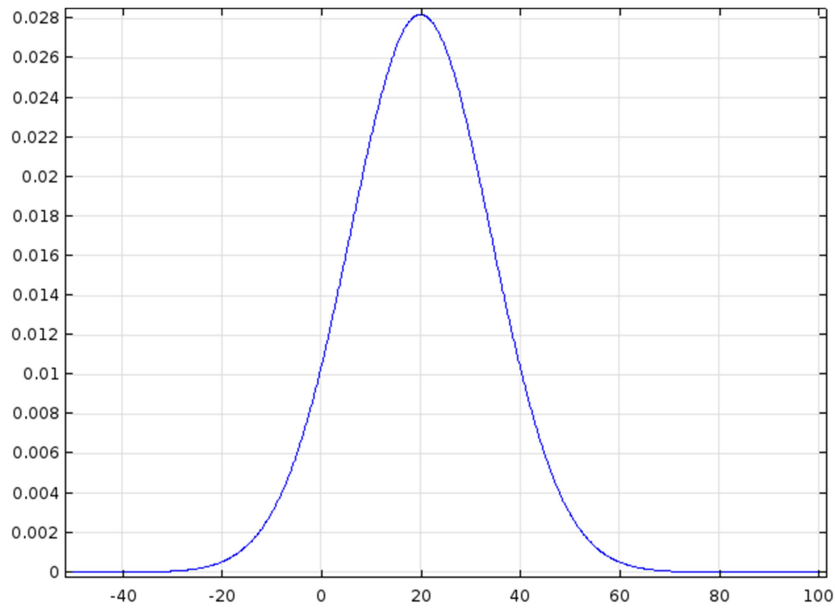


Figura 2.3. Campana de Gauss.

- Es importante considerar la capa de óxido que se forman entre las partículas metálicas al calentar el polvo. Esto afecta a la resistividad eléctrica y es considerado de la siguiente forma:

$$\rho_x = A_x \exp(E_x / 2 \cdot R \cdot T) \quad (5)$$

donde A_x es un factor pre-exponencial expresado en $\Omega \cdot m$, E_x es la energía de activación expresado en J/mol y R es la constante de gases ideales.

- Por último, hay que considerar la dependencia con la porosidad de las propiedades efectivas del polvo. Esta dependencia se modela de la siguiente forma [38].

$$d = d_m(1 - \theta) \quad (6)$$

$$c = c_m \quad (7)$$

$$\rho = \rho_m \left[\left(1 - \theta/\theta_M\right)^{-3/2} + \frac{6}{\pi} \alpha \left(1 - \theta/\theta_M\right)^{-1/2} \right] \quad (8)$$

$$\alpha = \left(\frac{\rho_x \delta}{\rho_m r} \right) \exp(-m_d \left(1 - \theta/\theta_M\right)^{n_d}) \quad (9)$$

$$k = k_m \left(1 - \theta/\theta_M\right)^{3/2} \quad (10)$$

donde d_m , c_m , ρ_m y k_m son las propiedades de los materiales en forma maciza, ρ_x es la conductividad eléctrica de la capa de óxido entre las partículas del polvo, θ_M es la porosidad de golpeo, r es el radio medio de las partículas, δ es el espesor medio de la capa de óxido. Por último, los parámetros adimensionales m_d y n_d modelan el deterioro de la capa de óxido.

- En el periodo de compactación en frío es modelada mediante la expresión de Secondi [39] como sigue:

$$\theta_0 = \theta_{inf} + (\theta_m - \theta_{inf}) \exp\left(-\left(P/a_s\right)^{b_s}\right) \quad (11)$$

donde θ_0 es la porosidad adquirida al final de la compactación en frío, θ_m es la porosidad de golpeo del polvo, θ_{inf} , a_s y b_s son parámetros que dependen del material del polvo y P es la presión a la que se encuentra sometido el polvo.

- En el periodo de compactación en caliente la porosidad es modelada con la siguiente ley [38]:

$$\frac{\dot{\theta}}{\theta} = -\dot{\varepsilon}_c \quad (13)$$

siendo

$$\dot{\varepsilon}_c = \frac{A_c}{T} \left(\frac{\sigma_{eq}}{E_m} \frac{\sqrt{\theta/\theta_m}}{1 - \theta/\theta_m} \right)^{n_c} \exp\left(-\frac{Q_c}{RT}\right) \quad (14)$$

donde T es la temperatura, A_c , n_c y Q_c son el factor preexponencial, el exponente y la energía de activación intervinientes en la ley potencial de termofluencia (*creep*) del material macizo, σ_{eq} es la tensión equivalente (Von Mises), R es la constante de gases ideales y E_m es el módulo de Young del material.

- Al variar la porosidad del polvo también lo hacen las demás propiedades del que se encuentran involucradas haciendo especial mención a la altura de la columna de polvo que se puede calcular con la siguiente expresión:

$$\theta = \frac{M}{S_N(1 - \theta)d_m} \quad (12)$$

donde M es la masa de polvo, S_N es el área del polvo, θ es la porosidad y d_m es la densidad el material macizo.

Resumiendo, las entradas del modelo son:

- La geometría del sistema
- Las propiedades de los materiales involucrados
- Tiempos de calentamiento y de enfriamiento
- Masa de polvo
- Intensidad de la corriente
- Presión

Las salidas del modelo son:

- Distribución de temperatura en el polvo para un tiempo determinado
- Distribución de porosidad en el polvo para un tiempo determinado
- Temperatura media del polvo a lo largo del tiempo
- Porosidad media del polvo a lo largo del tiempo
- Resistencia eléctrica de todo el compacto

2.3. Consideraciones preliminares de la simulación del proceso

En la figura 2.4 se muestran las entradas y salidas del modelo matemático creado para la implementación en Comsol Multiphysics.

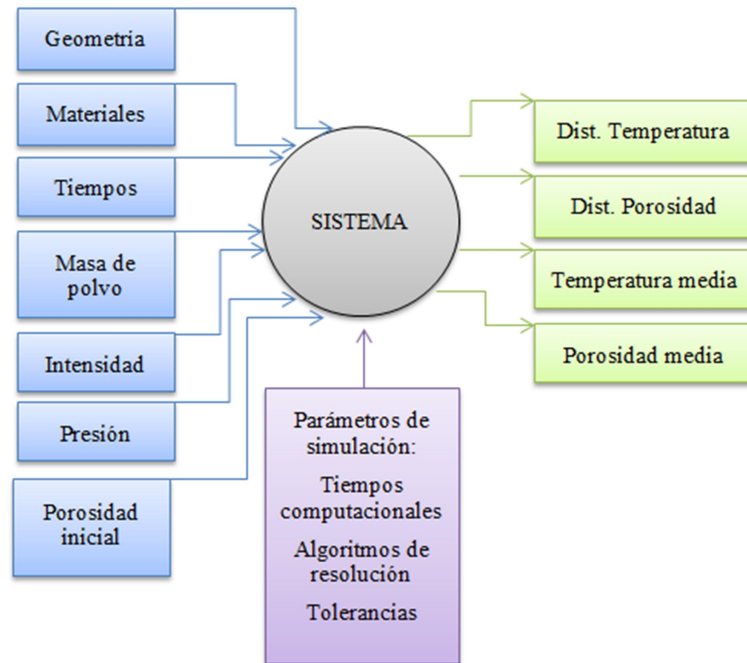


Figura 2.4. Estructura de entradas y salidas.

Por otro lado, es importante tener definidas las físicas involucradas en el sistema bajo estudio y estudiar las interacciones entre ellas. En el gráfico de la Figura 2.5, se puede ver la interacción de las distintas físicas intervinientes.

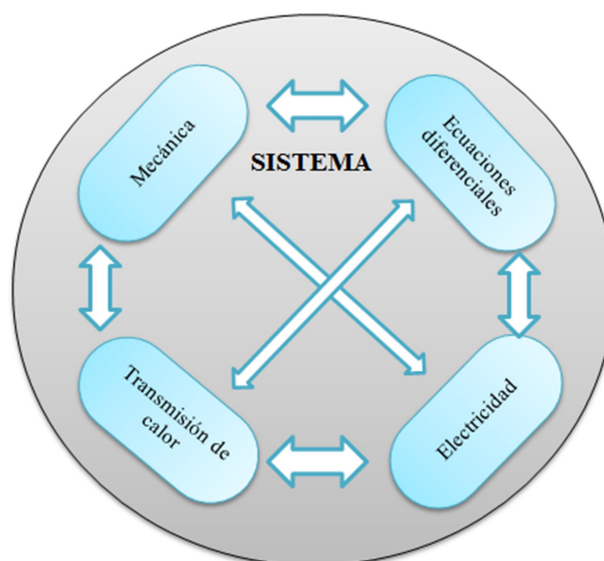


Figura 2.5. Acoplamiento entre físicas.

- Mecánica: al haber transmisión de cargas y desplazamientos relativos se tienen que considerar las ecuaciones que gobiernan la teoría de la elasticidad.
- Transmisión de calor: al existir calentamiento (*efecto Joule*) de los materiales involucrados por la corriente que recorre el sistema, esta fuente de generación de calor debe tenerse en cuenta las ecuaciones que gobiernan la transmisión de calor en sólidos.
- Electricidad: una corriente eléctrica recorre todo el sistema de modo que hay que tener en cuenta las ecuaciones que gobiernan los campos eléctricos en sólidos.
- Ecuaciones diferenciales: a parte de todas las físicas anteriormente descritas, es necesario implementar ecuaciones diferenciales adicionales relativas al cambio de porosidad que presenta el polvo a lo largo del proceso.

Como se ha dicho anteriormente, todas las físicas están fuertemente acopladas por lo que es necesario operar con un paquete multifísica que permita relacionar todas las físicas concernidas.

2.4. Implementación en Comsol Multiphysics

En este apartado se indican las consideraciones básicas y detalles concretos para las cuestiones más espinosas de la implementación del modelo anteriormente planteado con el paquete de elementos finitos Comsol Multiphysics.

2.4.1. Geometría

Debido a la simetría que goza el sistema, se puede considerar un modelo axisimétrico de modo que se reduce el problema tridimensional a un problema bidimensional. En la figura 2.6, se puede observar la geometría usada en la implementación.

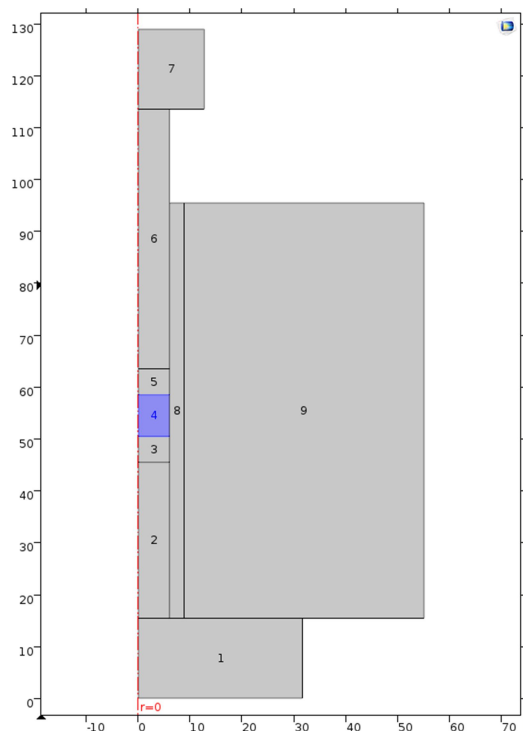


Figura 2.6. Geometría en Comsol Multiphysics.

En la geometría pueden ser modificadas la altura de la columna de polvo, de los punzones, etc. La lista de parámetros que pueden ser modificados es la siguiente:

- Altura de la masa de polvo. Pieza número 4 de la figura 9. La altura del polvo es obtenida de la siguiente forma:

$$H = \frac{M}{S_N(1 - \Theta)\gamma_m} \quad (15)$$

- Ancho de la masa de polvo. Pieza número 4 de la figura 2.6
- Altura y anchura de las obleas. Piezas número 3 y 5 de la figura 2.6
- Altura y anchura de los punzones. Piezas número 2, 6 de la figura 2.6
- Altura y anchura del molde cilíndrico. Pieza número 8 de la figura 2.6.
- Altura y anchura del aro metálico. Pieza número 9 de la figura 2.6.
- La base de los punzones (piezas número 1 y 7 de la figura 2.6) que tienen una geometría diferente también pueden ser dimensionadas.

Por tanto, dada la forma que presenta la geometría del sistema es posible simular cualquier dimensionalización de ésta que se desee. También es posible eliminar el zuncho metálico, en el supuesto caso de que no sea necesario.

2.4.2. Problema de contacto

Debido al movimiento relativo (por efecto de la la presión y densificación del polvo) que presenta la subestructura formada por punzones-obleas-polvo y el molde cilíndrico se debe tener en cuenta el contacto que presenta en la frontera entre ellos de manera que se permitan desplazamiento tangenciales entre ellos y que se transmitan las tensiones normales, pero nunca las tangenciales (rozamiento nulo).

Debido a la naturaleza del movimiento, a que lamalla utilizada poseerá más elementos en la subestructura que en el tubo cerámico y a que es más rígido el tubo cerámico que la subestructura se decide la elección del TARGET como el tubo cerámico y del CONTACTOR como la subestructura punzones-obleas-polvo.

2.4.3. Mallado

La elección del mallado nunca es una tarea fácil y más aún en un problema donde muchas físicas coexisten como es el caso del presente problema. No obstante, hay algunas ideas básicas que se proponen a continuación que se han usado para la elección del mallado.

En primer lugar, se sabe que es en la masa de polvo donde se presenta más variación de las propiedades del material. Por tanto, es conveniente poner más elementos en el dominio del polvo. Por otro lado, el problema es dependiente del tiempo y el perfil de intensidad que recorre el sistema también lo es, entonces es necesario poner más elementos en las zonas donde esta variación de intensidad se sienta más, esto es, en la subestructura formada por punzones-obleas-polvo.

A parte de estas ideas básicas, el tamaño de elementos, la elección de la forma de elementos y su tamaño se han estimado a base de prueba-error realizando muchas simulaciones para casos distintos de presión, intensidad, geometrías, etc.

No es posible elegir una malla definitiva debido a la complicación que presenta el problema ya que el tamaño de los elementos se ven fuertemente influenciados aunque las variaciones de los datos de entradas entre diferentes simulaciones sean relativamente pequeñas. Hacer hincapié en que las mallas que se presentan son mallas en las que la forma en la que se distribuyen sus elementos es lo que permanece constante para todas las posibles simulaciones que se piensen. El tamaño de los elementos debe de ser ajustado haciendo un análisis de

sensibilidad a la malla para cada simulación en particular.

Dicho lo cual, la malla finalmente elegida se presenta en las figuras 2.7, 2.8, 2.9 y 2.10.

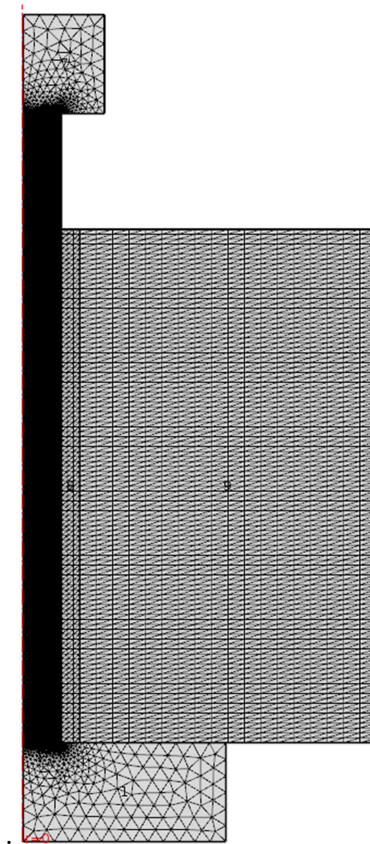


Figura 2.7. Mallado del modelo. Detalle general.

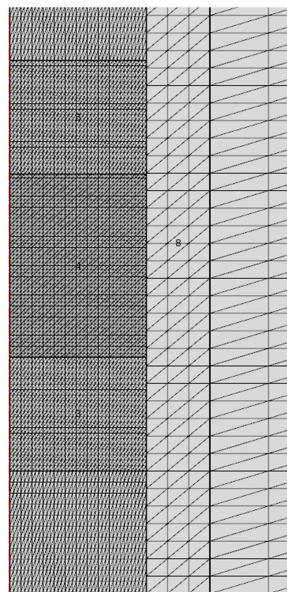


Figura 2.8. Mallado del modelo. Detalle masa de polvo y tubo cerámico.

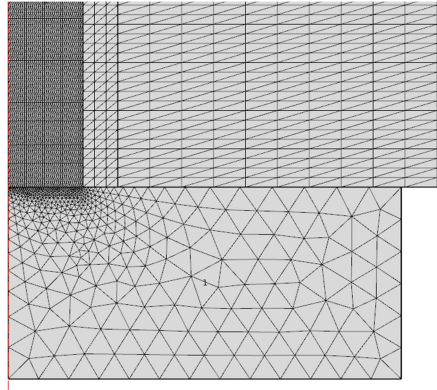


Figura 2.9. Mallado del modelo. Detalle del punzón inferior, tubo cerámico y zuncho.

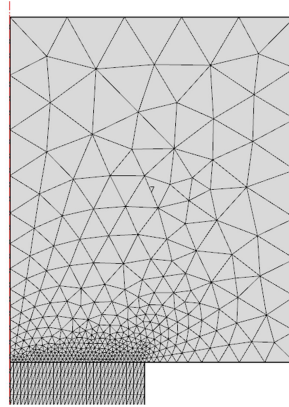


Figura 2.10. Mallado del modelo. Detalle del punzón superior con su base.

En las anteriores figuras, se observa la forma que se elige como óptima para el mallado. Dependiendo del tipo de solicitaciones (presión, intensidad, etc) se elegirá un tamaño de elementos menor o mayores.

Otra cuestión importante acerca de la malla es que debido a las posibles altas presiones y temperaturas a las que está sometido la masa de polvo es probable que se creen grandes deformaciones en el polvo y, por tanto, existan desplazamientos relativos muy grandes entre la subestructura formada por los punzones, obleas y polvo, y el molde cilíndrico haciendo por tanto que la malla quede muy deformada. Esto se traduce en problemas de convergencia a la hora de calcular las soluciones en cada elemento. Para solventar este problema, se hace uso de un artificio matemático denominado en Comsol como malla deformable.

Para ello, hay que considerar dos dominios en el modelo. Un dominio es el correspondiente a la propia malla deformable y el otro al mallado fijo. Esto se ve en la figura 2.11. Por tanto, se tienen dos mallas que actúan independientemente una de la otra solventando el problema de convergencia entre las fronteras y haciendo que, aunque se deforme mucho el polvo, las mallas creadas no creen elementos distorsionados.

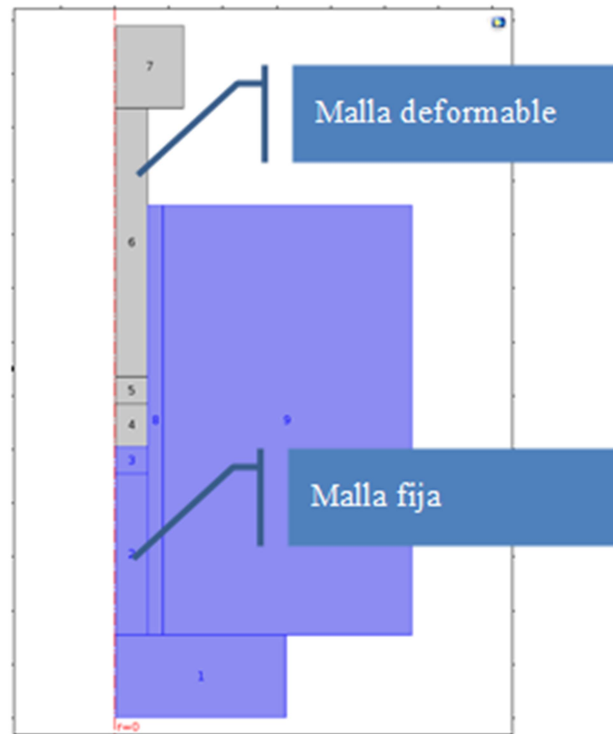


Figura 2.11. Malla deformada.

2.4.4. Módulos multifísica

Como se ha comentado en apartados anteriores, el problema presenta más de una física y éstas están fuertemente acopladas. En este apartado se comentan brevemente cada una de ellas.

A. Mecánica de sólidos

El sistema bajo estudio requiere un módulo de mecánica de sólidos debido a la presión ejercida por los punzones y las altas temperaturas que hacen que se creen deformaciones y tensiones a lo largo de los materiales que componen el sistema. Todos los materiales macizos son considerados elásticos e isotrópicos y se tiene en cuenta grandes desplazamientos. El comportamiento polvo será tratado individualmente para poder dar cuenta de su densificación.

Con respecto a las condiciones iniciales, se considera que todo el sistema tiene inicialmente desplazamiento y velocidades nulas.

Con respecto a las condiciones de contorno, se aplica una carga de presión en la base superior del punzón superior y se empotra la base inferior del punzón inferior.

Para resolver esta física es necesario tener el módulo de Young, el coeficiente de Poisson, el coeficiente de dilatación de todos los materiales.

B. Transmisión de calor

El sistema bajo estudio requiere un módulo de transmisión de calor debido a que se genera calor y en su interior por el paso de corriente eléctrica en el sistema (efecto Joule) y hay superficies refrigeradas, lo que garantiza la existencia de gradientes térmicos. Por tanto, es necesario la resolución de la ecuación diferencial de transferencia de calor, descrita en numerosas publicaciones, por ejemplo, Tjonov and Samarski [40], o Haberman [41].

Al igual que en mecánica de sólidos, todos los materiales son considerados térmicamente isotrópicos.

Con respecto a las condiciones iniciales, se considera que todo el sistema tiene inicialmente una temperatura de $298K$ y un gradiente de temperaturas nulo.

Con respecto a las condiciones de contorno, las bases de los punzones superior e inferior están a una temperatura T_s impuesta. Por otro lado, en el contorno externo de todas las piezas se impone un flujo de calor por convección y por radiación:

$$Q_{conv} = A_{sup} h(T_{aire} - T_{sup}) \quad (16)$$

$$Q_{rad} = A_{sup} \varepsilon \sigma (T_{ext}^4 - T_{sup}^4) \quad (17)$$

donde Q_{conv} y Q_{rad} son los flujos de calor por convección y por radiación, respectivamente, A_{sup} es el área de la superficie de la pieza en cuestión, h es el coeficiente de película, T_{ext} , T_{aire} y T_{sup} son la temperatura de radiación del cuarto, la temperatura del aire del cuarto y la temperatura de la superficie de la pieza en cuestión, respectivamente, σ es la constante de Stefan-Boltzmann y ε es la emisividad de la pieza en cuestión.

Este módulo requiere la conductividad térmica, el calor específico y la emisividad de cada material involucrado en el sistema.

Este módulo se comunica con el módulo de Corrientes eléctricas dado que el material, al recorrer una corriente eléctrica a través de él, tiende a calentarse. A este efecto se le conoce como *efecto Joule* (Ecuación 18).

$$Q = \frac{I^2 \rho}{S^2} \quad (18)$$

donde Q es el calor disipado por el efecto Joule, I es la corriente eléctrica, S es el área por donde circula la corriente y ρ es la resistividad eléctrica del material.

C. Corrientes eléctricas

El sistema bajo estudio requiere un módulo de corrientes eléctricas debido a la intensidad de corriente que circula por él. Todos los materiales involucrados se considerarán eléctricamente isótropos.

Con respecto a las condiciones iniciales, se considera que tanto el voltaje como el gradiente de voltaje es nulo.

Con respecto a las condiciones de contorno, se impone $0V$ en la base del punzón inferior y una densidad de intensidad en la base del punzón superior de la siguiente forma,

$$J = \frac{I}{S_p} \quad (19)$$

donde J es la densidad de corriente, I es la intensidad y S_p es la superficie de la base del punzón superior. Por otro lado, se impone que el flujo normal por las superficies que están en contacto con la pared es nulo.

Este módulo requiere la resistividad eléctrica de cada material involucrado en el sistema.

D. Ecuaciones diferenciales

Este módulo es usado para poder implementar el efecto de la porosidad en el polvo y es regido por las ecuaciones (13) y (14). En el instante inicial, se considera que la porosidad es igual a la porosidad obtenida al final de la etapa de compactación en frío θ_0 .

2.4.5. Resolución

Para obtener los resultados apropiados se deben ajustar los resolvers para asegurarnos buenos resultados. Es más, debido a los tiempos tan cortos del proceso (alrededor del segundo) y las altas intensidades a las que está sometida los materiales, se debe de tener en cuenta los grandes gradientes que aparecerán y los problemas de convergencia debidos a estos. Por tanto, se debe ajustar los parámetros inteligentemente de modo que las simulaciones no se demoren hasta la eternidad ni que los resultados no sean lo suficientemente precisos.

Como se ha dicho, el tiempo que dura el proceso es del orden del segundo, por tanto se debe ajustar el paso de tiempo máximo de modo que dé alrededor de, almenos, 100 resultados en ese tiempo. Si esto no ocurre, puede que los resultados obtenidos no sean tan precisos como se quiere y por supuesto, que aparezcan problemas de convergencia.

El paso de tiempo mínimo es obtenido gracias a la resolución en el dominio temporal por métodos Runge-Kutta o BDF (típicamente de orden 2) de forma que las variables dependientes no varíen más de una tolerancia impuesta por el usuario, típicamente (0.001), aunque se disminuya el paso de tiempo.

Las variables dependientes son las siguientes:

$T \equiv$ Temperatura (transmisión de calor)

$V \equiv$ Voltaje (corrientes eléctricas)

$RZ \equiv$ desplazamiento de malla (malla deformada)

$\theta =$ porosidad (ecuaciones diferenciales)

$u =$ desplazamientos (mecánica de sólido)

Al ser un problema fuertemente acoplado, la resolución se tiene que hacer segregada. Esto es, se resuelven las físicas involucradas en el sistema en cascada como indica la figura 2.12.

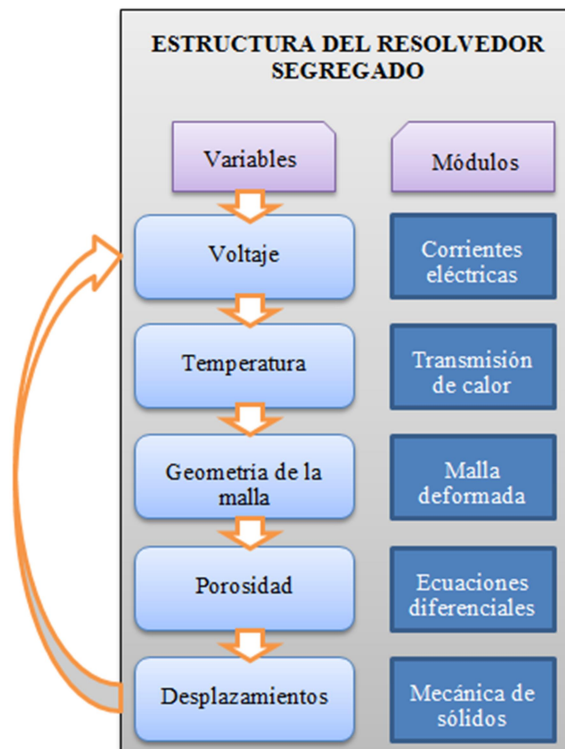


Figura 2.12. Estructura del resolver segregado y las físicas involucradas.

Por cada paso de tiempo, se resuelve el problema segregado, se comprueban las tolerancias de cada variable y, si estas son menores, se pasa al siguiente paso de tiempo; si son mayores, se disminuye el paso de tiempo.

2.5. Interfaz del simulador de S.R.E.

Para optimizar el proceso de introducción de datos y presentación de resultados se ha realizado una interfaz gráfica que optimiza estas tareas. Esta interfaz ha sido desarrollada mediante el paquete adicional *constructor de aplicación* de Comsol Multiphysics, aunque algunos aspectos han requerido programación en JAVA. En la figura 2.13 se muestra una vista previa general de esta interfaz.

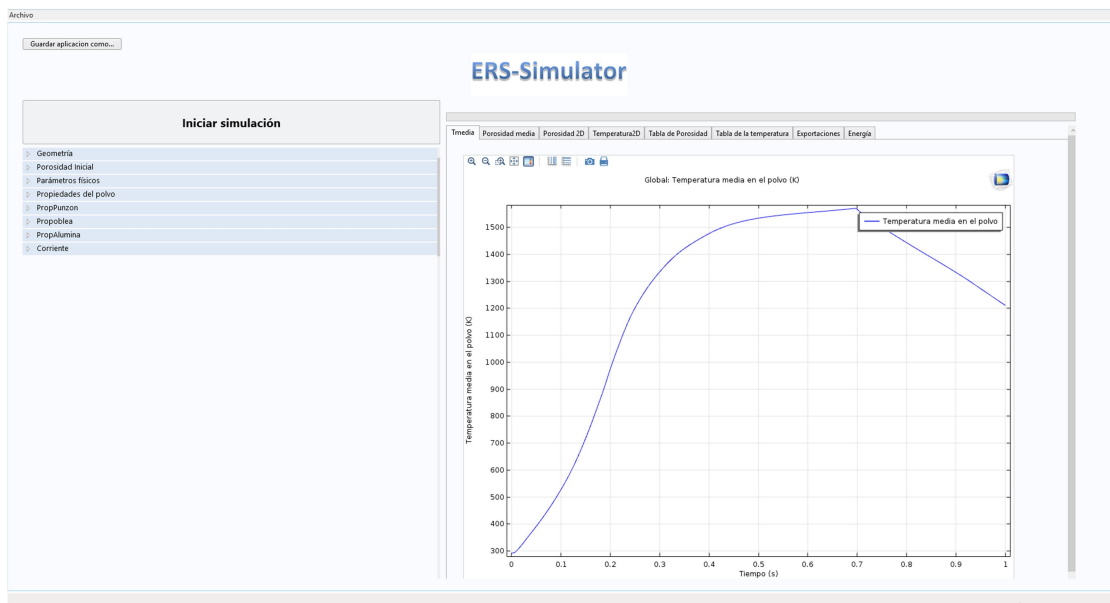


Figura 2.13. Vista general de la interfaz.

Como puede observarse, hay dos zonas bien diferenciadas. La zona de la izquierda de la interfaz está destinada a las entradas del modelo, mientras que en la zona de la derecha se muestran los resultados de la simulación (gráficas, tablas, archivos exportables, etc.).

Por otro lado, una vez que se han insertado todas las entradas del sistema, solo es necesario hacer click en el botón de *Iniciar simulación* para iniciar la simulación, al cabo de la cual se obtendrán todos los resultados que en breve se exponen.

Las entradas al modelo se introducen mediante diferentes cuadros de diálogo que se abren al hacer click sobre cada uno de los expandores mostrados a la izquierda de la pantalla. En la figura 2.15 se muestra el correspondiente a los parámetros geométricos. Si se quiere ver cómo queda el sistema con las dimensiones introducidas, simplemente hay que pulsar el botón *Ver geometría actual* y se obtiene un esquema de la geometría resultado, ver figura 2.14.

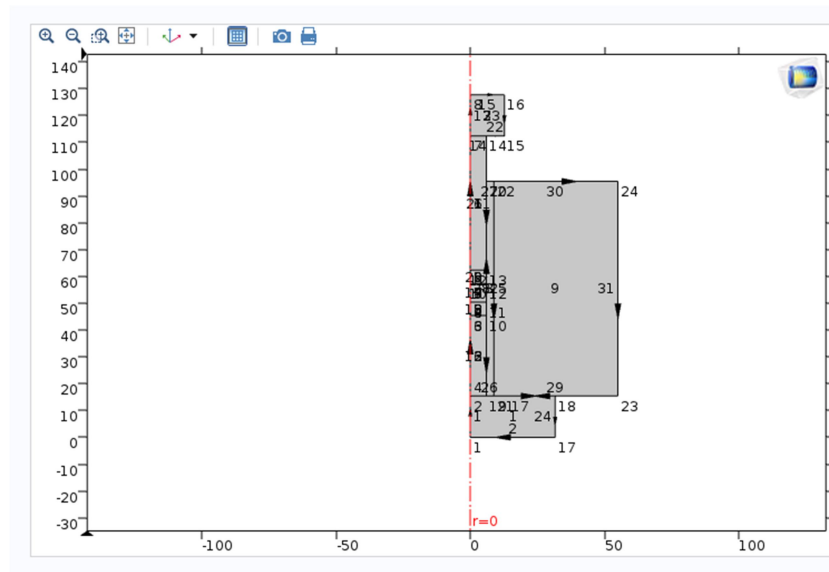


Figura 2.14. Geometría actual del sistema.

▼ Geometría

Diametro de la base inferior:	mm
Altura de la base inferior:	mm
Diametro del punzon inferior:	mm
Altura del punzon inferior:	mm
Altura de la oblea inferior:	mm
Altura de la oblea superior:	m
Altura del punzon superior:	mm
Diametro de la base superior:	mm
Altura de la base superior:	m
Diametro del tubo:	mm
Altura del tubo externo:	m
Altura de la muestra de polvo:	mm
Diametro del zuncho:	mm

Ver geometría actual

Figura 2.15. Introducción de parámetros que describen la geometría del sistema.

Pulsando el expansor denominado *Porosidad inicial* se da acceso al cuadro de diálogo mostrado en la Fig. 2.16 donde se insertan todos los datos referentes a los parámetros de la expresión de Secondi que permiten el cálculo de la porosidad inicial (porosidad después del proceso de compactación en frío).

▼ Porosidad Inicial

Porosidad de Golpeo:

Parametro a de la expresión de Secondi (Inialmente 7.5633e8 [Pa]): Pa

Parámetro Theta Infinito de la expresión de Secondi:

Parametro a de la expresión de Secondi (Inialmente 7.5633e8 [Pa]):

$$\Theta_0 = \Theta_\infty + (\Theta_M - \Theta_\infty) \exp\left(-\left(P_N/a\right)^b\right)$$

Figura 2.16. Entrada de parámetros para la obtención de la porosidad inicial.

En el cuadro de diálogo correspondiente al expansor *Parámetros físicos* (Fig. 2.17) se insertan todos los datos referentes a los parámetros de la masa de polvo, presión en la masa de polvo y condiciones iniciales de temperatura necesarias para realizar la simulación.

Figura 2.17. Entrada de parámetros físicos del modelo.

En el cuadro de diálogo correspondiente al expansor de *Propiedades del polvo* (Fig. 2.18) se insertan todos los datos referentes a las propiedades del material macizo que constituye el polvo para todas las físicas (mecánica, corrientes eléctricas, etc). Algunos datos que son dependientes de la temperatura pueden ser insertados en forma de tabla.

Temperatura		Calor latente
1185[K]		16000
1667[K]		15000
1809[K]		247000
1787[K]		0

Figura 2.18. Entrada de las propiedades del material del polvo.

En el cuadro de diálogo correspondiente al expansor de *Propiedades de los punzones* (Fig. 2.19), se insertan todos los datos referentes a las propiedades del material que componen los punzones para todas las físicas (mecánica, corrientes eléctricas, etc). Algunos datos que son dependientes de la temperatura pueden ser insertados en forma de tabla.

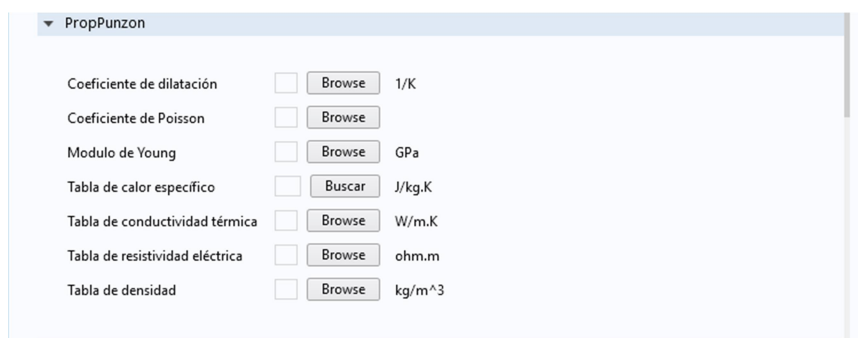


Figura 2.19. Entrada de las propiedades del material de los punzones.

En el cuadro de diálogo correspondiente al expansor de *Propiedades de las obleas* (Fig. 2.20), se insertan todos los datos referentes a las propiedades del material que componen las obleas para todas las físicas (mecánica, corrientes eléctricas, etc). Algunos datos que son dependientes de la temperatura pueden ser insertados en forma de tabla.

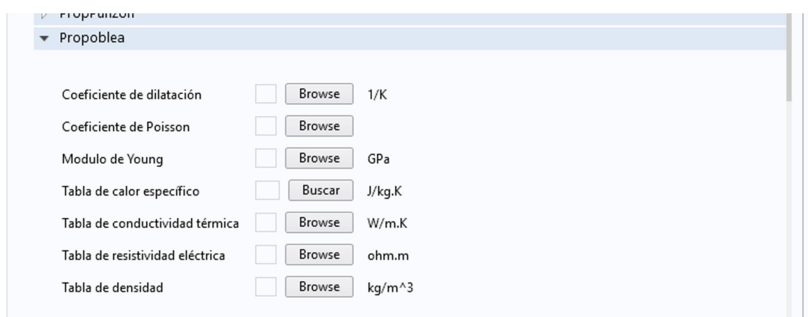


Figura 2.20. Entrada de las propiedades del material de las obleas.

En el cuadro de diálogo correspondiente al expansor de *Propiedades del tubo cilíndrico* (Fig. 2.21), se insertan todos los datos referentes a las propiedades del material que componen el tubo cilíndrico para todas las físicas (mecánica, corrientes eléctricas, etc.). Algunos datos que son dependientes de la temperatura pueden ser insertados en forma de tabla.

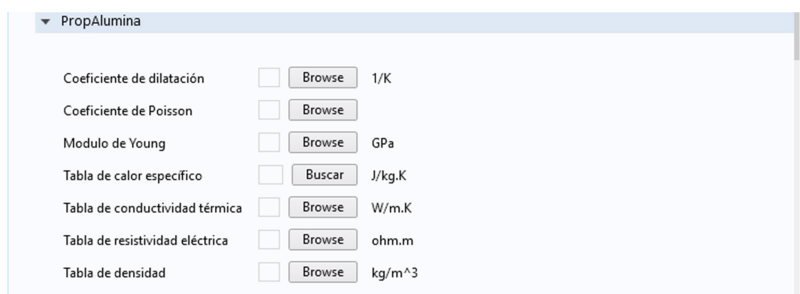


Figura 2.21. Entrada de las propiedades del material del tubo cilíndrico.

En el cuadro de diálogo correspondiente al expansor de *Propiedades de la corriente eléctrica* (Fig. 2.22), se insertan todos los datos referentes a los parámetros de la corriente eléctrica que recorre el sistema. Se puede elegir entre un perfil de intensidades con 1 pulso o con dos pulsos.

Corriente

1 pulso <--Pulse para seleccionar 1 pulso

Tiempo antes del paso del primer pulso de corriente: 0.001 s

Tiempo del primer pulso de corriente: 0.7 s

Tiempo de rampa subida primer pulso de corriente: 0.01 s

Tiempo de rampa bajada del primer pulso de corriente: 0.005 s

Tiempo entre primer pulso de corriente y el segundo: 0.3 s

Intensidad del primer pulso de corriente: 10000 A

Tiempo total de simulación con 1 pulso: 1.001 s

Ver perfil un pulso

2 pulsos <-- Pulsar para seleccionar 2 pulso

Tiempo antes del paso del primer pulso de corriente: 0.001 s

Tiempo del primer pulso de corriente: 0.7 s

Tiempo de rampa subida primer pulso de corriente: 0.01 s

Tiempo de rampa bajada del primer pulso de corriente: 0.005 s

Tiempo entre primer pulso de corriente y el segundo: 0.3 s

Tiempo del segundo pulso de corriente: 0.10 s

Tiempo de rampa subida del segundo pulso de corriente: 0.010 s

Tiempo de rampa bajada del segundo pulso de corriente: 0.010 s

Tiempo después del segundo pulso de corriente: 0.01 s

Intensidad del primer pulso de corriente: 10000 A

Intensidad del segundo pulso de corriente: 2000 A

Tiempo total de simulación con dos pulsos: 1.111 s

Ver perfil de dos pulsos

Figura 2.22. Entrada de las propiedades de la corriente.

Pulsando el botón “Ver perfil un/dos pulsos” se puede observar la forma que adquiere el perfil de corriente para los datos que propuestos. En la figura 2.23 se observa un ejemplo para unos datos concretos.

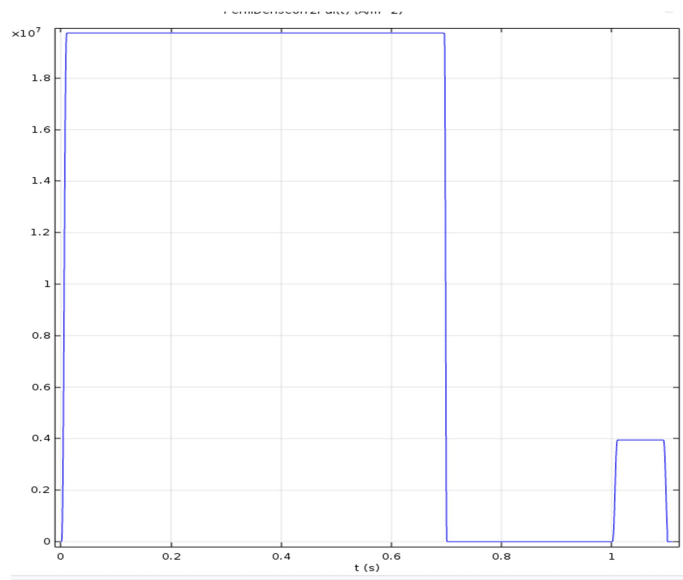


Figura 2.23. Ejemplo de un perfil de corriente.

Se puede observar dos pulsos de intensidades en el perfil de diferente amplitud y separados una distancia concreta en el tiempo.

Una vez comentadas las entradas necesarias para la simulación, se procede a comentar las salidas o resultados que el modelo devuelve. Elegibles como pestañas, se reúnen una serie de gráficas de habitual interés en el

proceso de S.R.E. Estas son: *Temperatura media a lo largo del tiempo* (Fig. 2.24), *Porosidad media a lo largo del tiempo* (Fig. 2.25), *Perfil de porosidad en la masa de polvo a lo largo del tiempo* (Fig. 2.26), *STE a lo largo del tiempo* (Fig. 2.27), y *Perfil de temperaturas en el sistema a lo largo del tiempo* (Fig. 2.28).

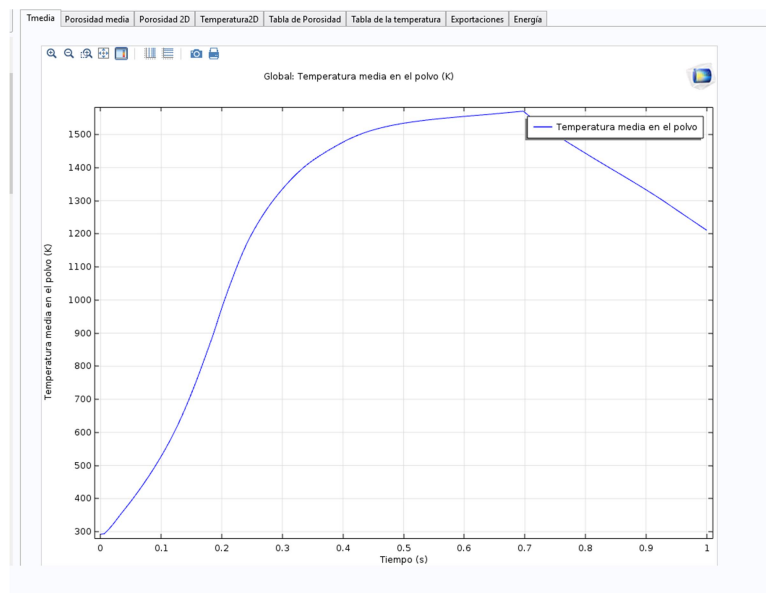


Figura 2.24. Temperatura media a lo largo del tiempo.

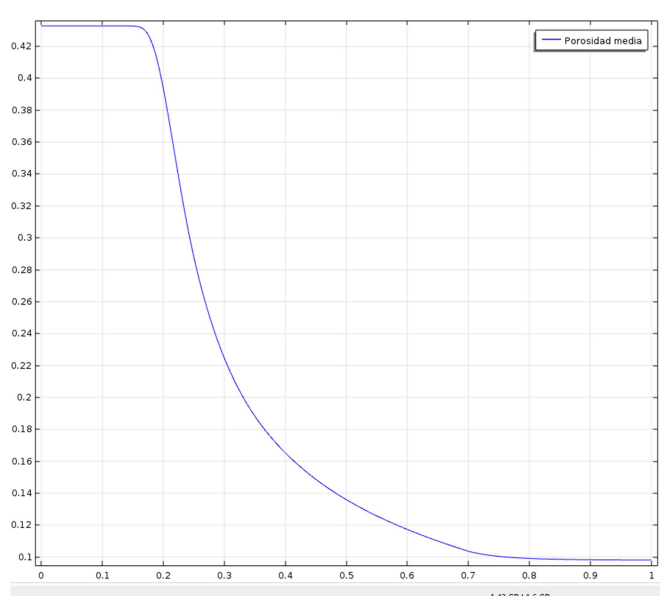


Figura 2.25. Porosidad media a lo largo del tiempo.

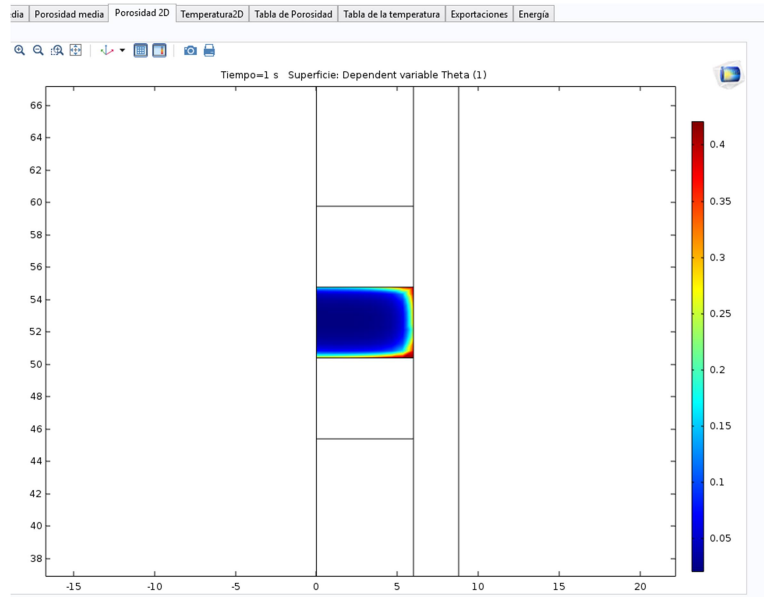


Figura 2.26. Perfil de poroisdad en la masa de polvo a lo largo del tiempo.

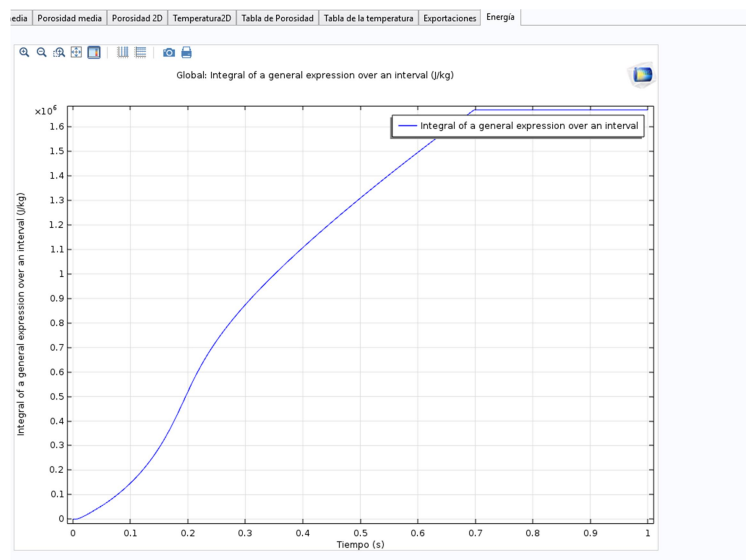


Figura 2.27. STE a lo largo del tiempo.

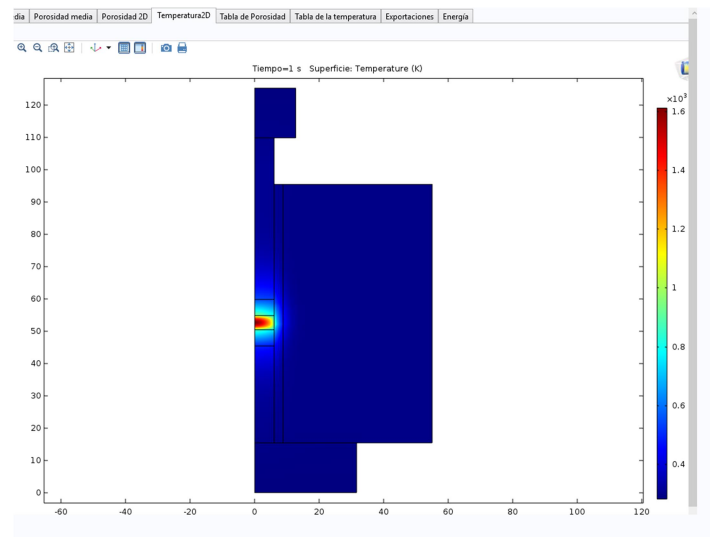


Figura 2.28. Perfil de temperaturas en el sistema a lo largo del tiempo.

La pestaña *Exportaciones*, ofrece un cuadro de diálogo que permite la *Exportación en forma de tabla de los resultados* seleccionados (Fig. 2.29).

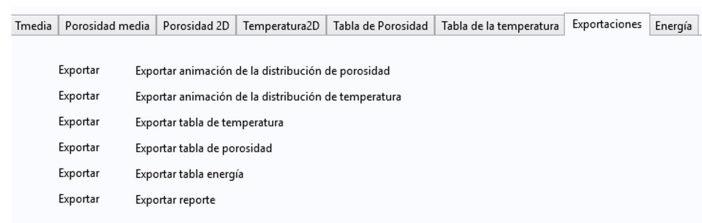


Figura 2.29. Exportación en forma de tabla de los resultados.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se muestran los principales resultados obtenidos mediante el simulador desarrollado en Comsol Multiphysics para una geometría y materiales concretos. La finalidad de este capítulo no es más que la demostración de la operatividad y convergencia de la implementación desarrollada y no un estudio exhaustivo y contrastado de las predicciones físicas arrojadas por el simulador. Tales cuestiones escapan de los objetivos marcados en este proyecto, por lo que serán abordadas en el marco de otras investigaciones.

3.1. Datos del caso a simular

Supondremos que la geometría del sistema permanece constante para todas las simulaciones propuestas, así como las dependencias térmicas de las propiedades de todos los materiales, recogidas en el Anexo de esta memoria. Conforme a las hipótesis del modelo, asumiremos que la presión propuesta se mantiene constante en todo el proceso. Su valor será de 100 MPa mientras no se indique lo contrario.

Supondremos, además que el perfil de intensidades es de un solo pulso, con la forma mostrada en la figura 3.1. Los parámetros que se variarán de una simulación a otra son los valores del tiempo de calentamiento así como de la intensidad máxima que recorre el sistema.

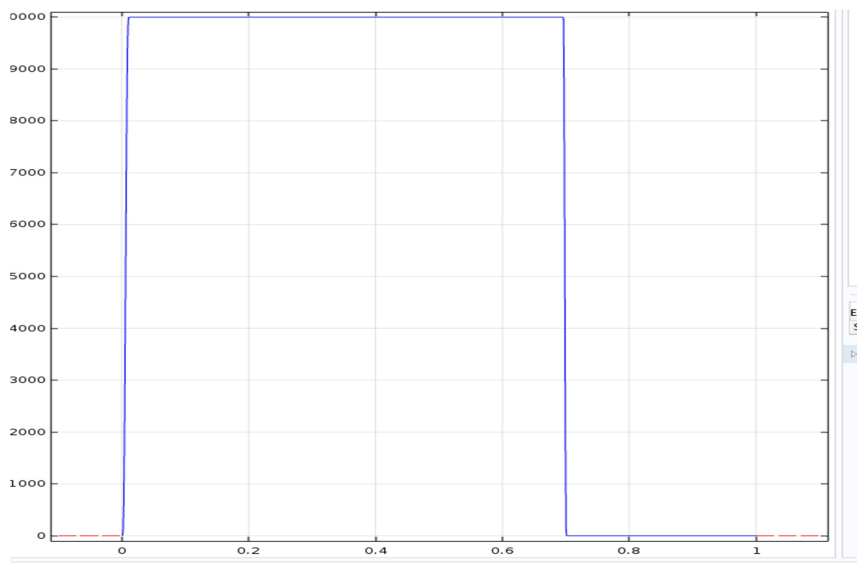


Figura 3.1. Forma del perfil propuesto para la intensidad de corriente.

En la Tabla 3.1 se reúnen los datos referentes a la geometría del sistema.

Tabla 3.1. Datos geométricos del sistema empleados en las simulaciones de pruebas.

Dato	Dimensión [mm]
Altura de la masa de polvo	6.9
Radio de la masa de polvo	6
Altura de las obleas	5
Radio de las obleas	6
Altura del punzón superior	50
Altura del punzón superior	30
Radio de los punzones	6
Altura de la base del punzón superior	15.4
Radio de la base del punzón superior	12.7
Altura de la base del punzón inferior	15.4
Radio de la base del punzón inferior	31.6
Espesor del tubo cilíndrico	2.8
Altura del tubo cilíndrico	80
Espesor del zuncho	46.2
Altura del zuncho	80

Para obtener una malla fiable, se ha ido variando el número de elementos del sistema de modo que los errores relativos de la porosidad y temperatura media en el tiempo final fuesen menores que el 1%.

El mallado usado prácticamente ha sido el mismo, salvo en algunas simulaciones puntuales en las que se ha tenido que aumentar el número de elementos en la zona de la masa de polvo para que los resultados convergieran y se obtuvieran errores relativos menores a 1%.

En la figura 3.2 y 3.3 se puede observar los errores relativos obtenidos para un análisis de sensibilidad de malla. Finalmente se elige como número de elementos finales para realizar la simulación de 128000 elementos.

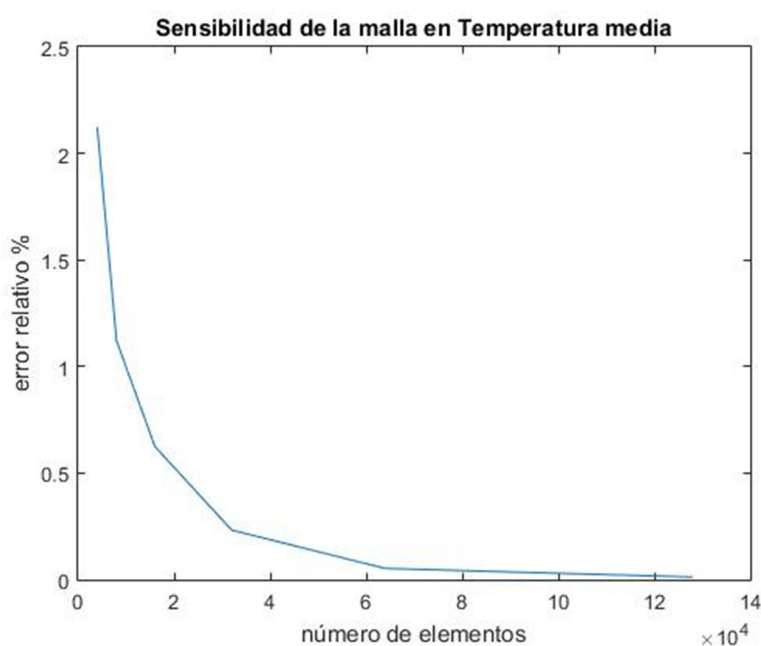


Figura 3.2. Sensibilidad de la malla en temperatura.

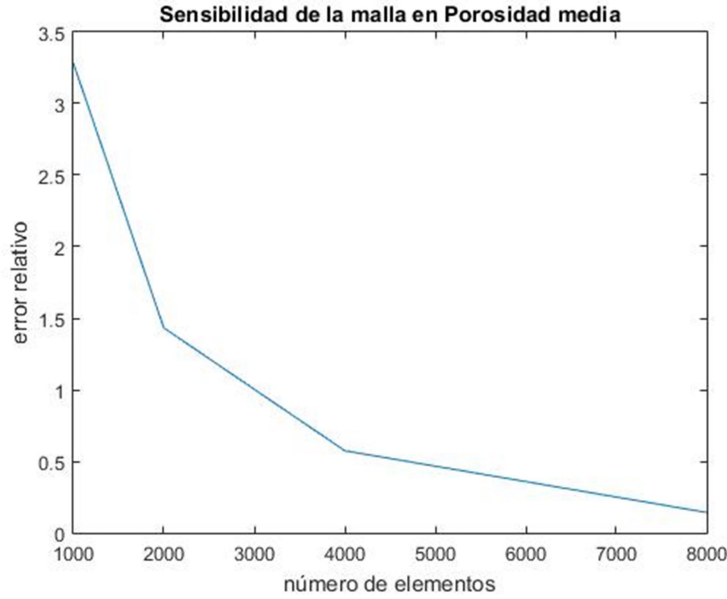


Figura 3.3. Sensibilidad de la malla en porosidad.

Por otro lado, se ha obtenido un tiempo de paso máximo que garantiza que los errores relativos sean menores del 1%. Como se ha mencionado en apartados anteriores, se han dispuesto métodos BDF que, en caso de algún problema durante la simulación, disminuirían automáticamente el tiempo de paso para forzar una mejor convergencia.

Se ha constatado que el tiempo de paso máximo no altera, en gran medida, los resultados finales obtenidos siempre que sean menores de 5 milisegundos. Con tiempos mayores, la simulación no convergería.

Las tolerancias relativas y absolutas para cada variable dependiente (temperatura, voltaje, porosidad y desplazamientos) han sido de 0.001 en todos los casos, pudiendo en el caso de la variable temperatura, aumentar ambas tolerancias a 0.01. El aumento de las tolerancias de otras variables conduce a que el problema no convergería, siendo por tanto necesario no exceder los valores de tolerancias fijados. En la Ecuación (20) se muestra la relación entre las tolerancias relativas y absolutas y el error de la variable " e " en la iteración " i " que emplea Comsol Multiphysics para estimar el error permitido:

$$|e_y(i)| \leq Tol_{rel} \cdot |y(i)| + Tol_{abs}(y(i)) \quad (20)$$

donde $e(i)$ es el error de la variable dependiente " y " en la iteración " i ", Tol_{rel} y Tol_{abs} son la tolerancia relativa y la tolerancia absoluta, respectivamente y por último, $y(i)$ es la variable dependiente en la iteración " i ".

Por último, se ha optado por el método de *Newton* para la resolución de cada problema segregado (físicas). Debido al claro comportamiento no lineal de éstas.

Los tiempos de computacionales de una simulación completa son del orden de la hora.

3.2. Búsqueda de parámetros críticos mediante regresión

Para la obtención de los resultados se tiene que tener constancia de que los resultados obtenidos son acordes con los resultados experimentales. El principal dato experimental, adquirido durante la realización de una experiencia de consolidación, es la evolución de la porosidad global de la masa de polvo. Aunque la mayoría de los parámetros de entrada que necesita el modelo se encuentran tabulados en la literatura especializada, algunos no pueden ser, amén de que es necesario mantener algún parámetro ajustable en el modelo para dar flexibilidad al mismo (todo modelo supone una idealización radical que considera ciertas características del

proceso como relevantes y otras como superfluas. Los modelos tentativos, como es el que aquí se ha planteado, deben introducir cierto grado de libertad, que aporte flexibilidad.

Los parámetros considerados más críticos en el modelo (a partir de análisis de sensibilidad previos) son el factor preexponencial (A_c) y el exponente (n_c) de la ley potencial de termofluencia (creep) (Ecuación 14). No solo no se dispone de sus valores exactos, en la literatura hay controversia, sino que mínimos cambios en ellos se traducen en fuertes variaciones en los resultados finales. Por otro lado, considerar que el polvo es lineal y elástico cuando realmente no lo es hace que los resultados difieran ligeramente de la realidad.

Para resolver estas dos dificultades, se ha adoptado la siguiente estrategia: comparar la evolución de la porosidad global (promedio) de la masa de polvo a lo largo del proceso. La evolución típica de esta variable se muestra en la figura 2.25.

Se impone, por tanto, hacer una optimización de los parámetros A_c y n_c (por regresión) de modo que la curva de evolución de porosidad media teórica coincida lo más posible con la adquirida experimentalmente.

Esta optimización se realiza con el algoritmo de Levenberg–Marquardt que es óptimo para ajustar curvas experimentales con resultados teóricos. El módulo de optimización de COMSOL Multiphysics® permite realizar esta tarea.

Se propone hacer dos experiencias reales de S.R.E. con sus correspondientes simulaciones. Para la primera experiencia, las condiciones de procesamiento se fijaron en unos valores típicos: 8 kA , 700 ms de tiempo de calentamiento, 300 ms de tiempo de enfriamiento y 100 MPa de presión. Para la segunda experiencia (de contraste), se fijaron en: 10 kA , 700 ms de tiempo de calentamiento, 300 ms de tiempo de enfriamiento y 100 MPa de presión.

Utilizando como curva objetivo la curva experimental de la primera experiencia, se inició la optimización con el objetivo de encontrar los valores óptimos para los parámetros A_c y n_c que minimizaran las diferencias cuadráticas entre curva experimental y simulada (el tiempo de computación fue de 8 horas). Los valores óptimos resultaron ser $A_c = 10^{30}$ y $n_c = 4.6$. A partir de este momento, estos valores se consideraron fijos y plenamente establecidos. Para contrastar su validez, se realizó la segunda experiencia que serviría para comparar de nuevo curva experimental y simulada, en otras condiciones de procesamiento.

Como puede apreciarse en la figura 3.4, la discrepancia entre curva predicha y curva simulada para la segunda experiencia fue suficientemente pequeña.

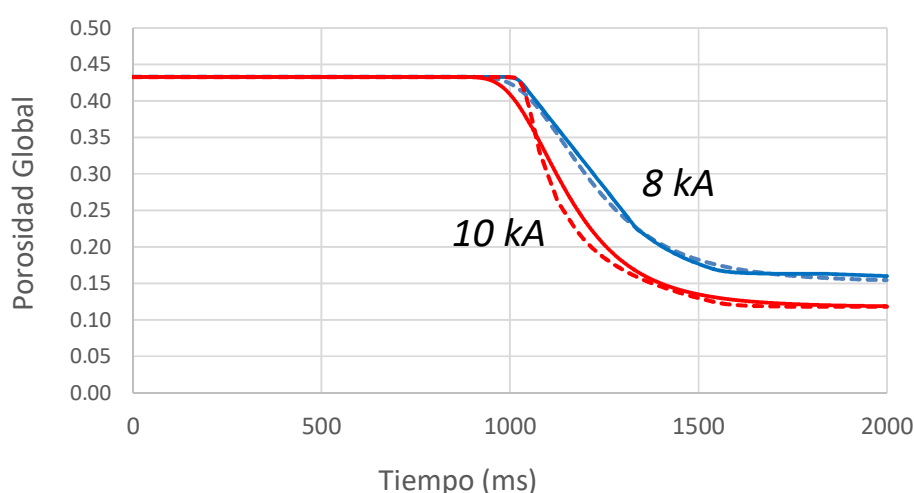


Figura 3.4. Comparativa de las curvas simuladas y adquiridas experimentalmente. Las curvas azules son las correspondientes a la experiencia 1, la de optimización; las curvas rojas corresponden a la experiencia 2. Las curvas a trazos son las obtenidas mediante simulación; las continuas representan las curvas adquiridas experimentalmente.

3.3. Resultados obtenidos

Una de los principales beneficios que se espera de la simulación es la obtención de información que no es accesible experimentalmente. Entre esta información se incluye la distribución de temperaturas y de porosidad. Si bien es posible conocer la distribución inicial y final de porosidad del compacto, no hay modo experimental de conocer la distribución de porosidades durante la realización del proceso. Algo similar sucede con la temperatura, en cuyo caso, ni siquiera podemos tener acceso a la distribución final de temperaturas. Dado que estas cuestiones son extraordinariamente relevantes, se entiende las enormes expectativas depositadas en el simulador desarrollado.

Para una sección del sistema, en las figuras 34 y 35 se muestran los mapas de distribución de temperatura y de porosidades para una simulación realizada para las siguientes condiciones de procesado: 9 kA, 300 ms de tiempo de calentamiento, 400 ms de tiempo de enfriamiento y 100 Mpa de presión.

Globalmente, se observa como las temperaturas más extremas se consiguen en la masa de polvo debido a las propiedades que presentan los materiales a consolidar existiendo un fuerte gradiente en su dominio y haciendo por tanto, que algunas zonas queden más densificadas que otras. En las obleas y el molde cilíndrico existe un fuerte gradiente de temperatura como se esperaba ya que el objetivo es mantener altas temperaturas en el polvo para conseguir mayor densificación en él. Este fuerte gradiente de temperaturas hace que las demás piezas que conforman el sistema no tengan que soportar altas temperaturas ampliando así el abanico de materiales a escoger para ellas. Por otro lado, las figuras 3.7 y 3.8 muestran como el flujo de corriente es bien conducido por la subestructura formada por los punzones, obleas y masa de polvo de modo no existen grandes pérdidas de energía eléctrica debido a que prácticamente la totalidad de la corriente eléctrica recorre la masa de polvo.

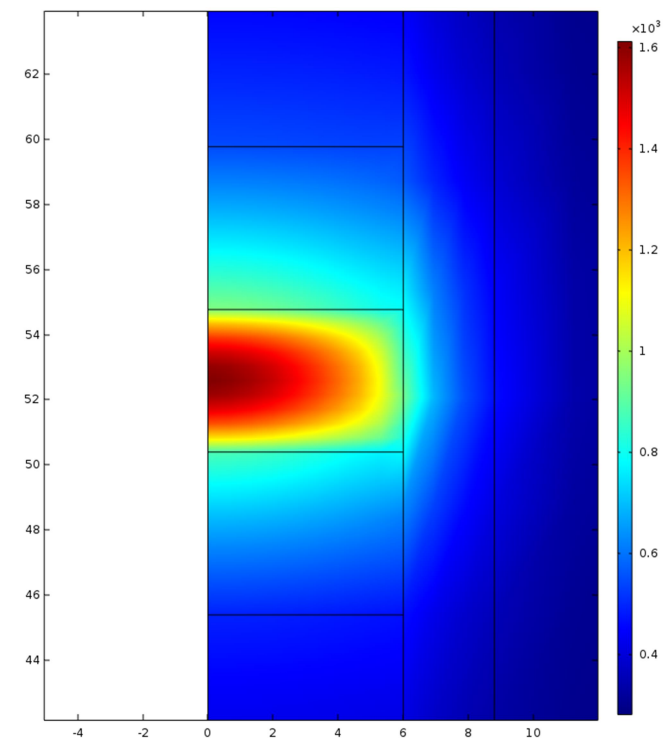


Figura 3.5. Mapa de distribución de temperaturas.

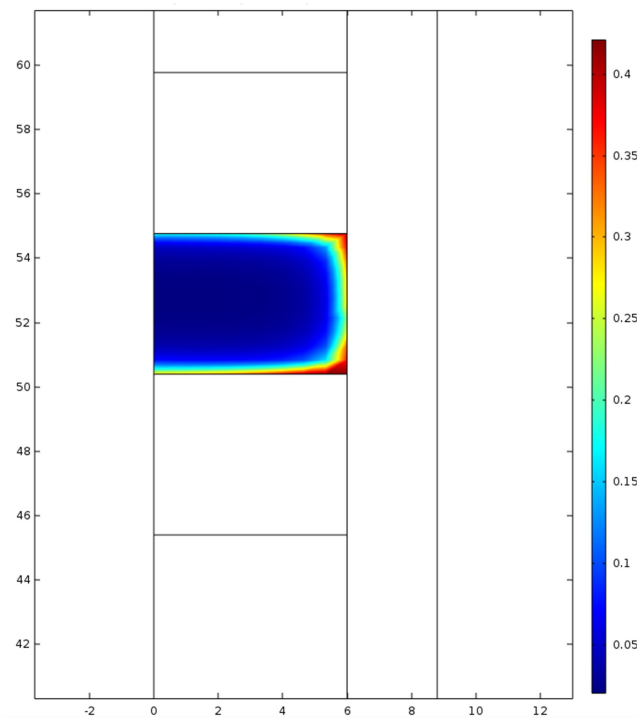


Figura 3.6. Mapa de distribución de porosidades.

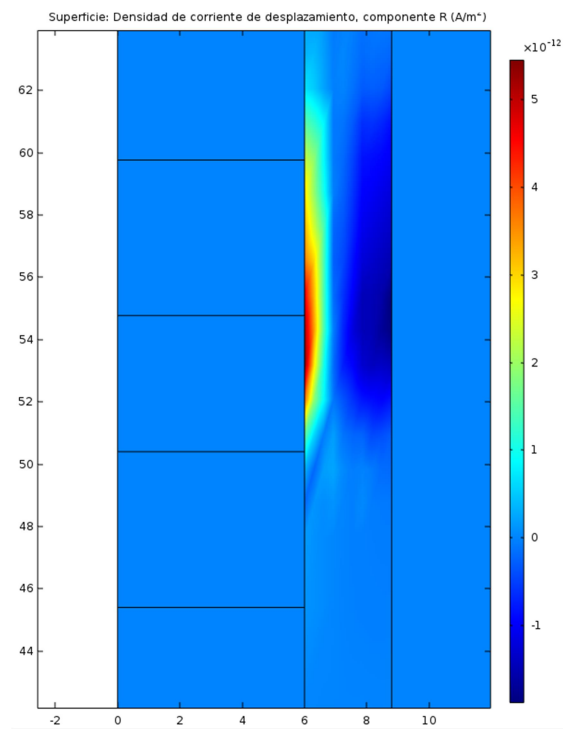


Figura 3.7. Densidad de corriente en dirección horizontal.

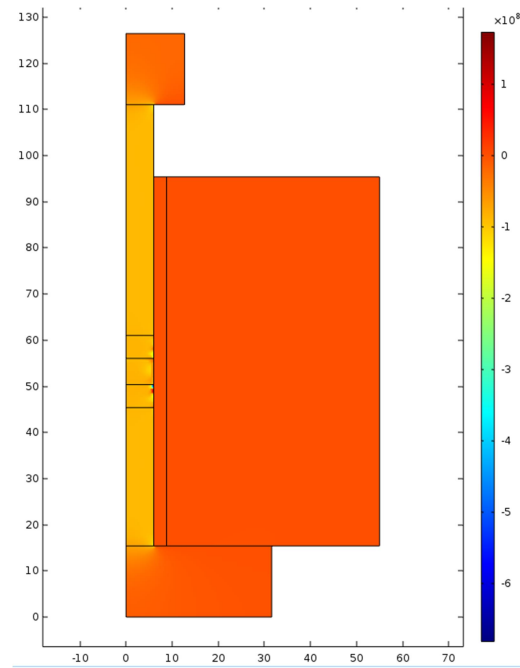


Figura 3.8. Densidad de corriente en dirección vertical.

El mapa de distribución de porosidad obtenido con la simulación señala que la periferia del compacto (en contacto con las paredes más frías) resulta más poroso (valores de porosidad del orden de 0.3) que el corazón del compacto (máxima porosidad: 0.027), que resulta más densificado, en consonancia con dicha zona es la que alcanza las temperaturas más altas (máxima temperatura: 1623 K). Estas predicciones se confirman perfectamente con la observación de micrografías sobre cortes longitudinales en compactos sinterizados por S.R.E. La Figura 3.9 muestra una micrografía óptica de la sección longitudinal de un compacto sinterizado eléctricamente.

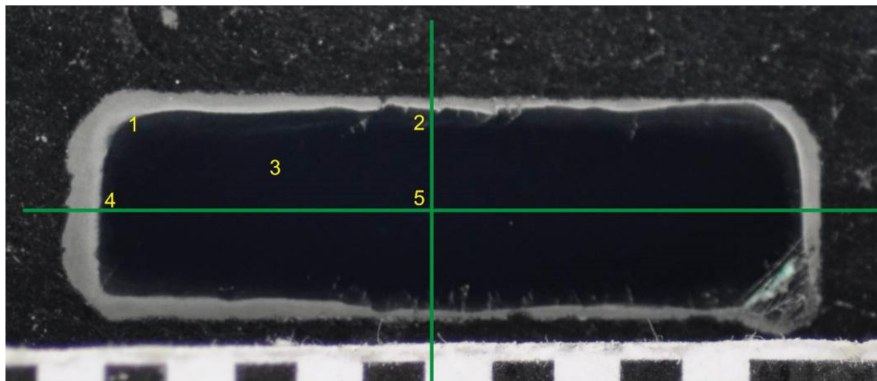


Figura 3.9. Sección diametral de un compacto consolidado eléctricamente con baja intensidad de corriente (6 kA) y tiempo de calentamiento de 500 ms. Los puntos numerados indican zonas donde se practicaron medidas de dureza para correlacionar con la porosidad.

3.4. Influencia del tiempo de calentamiento

Se compara la variación de temperatura y porosidad medias para diferentes tiempos de calentamiento (300, 500 y 1000 ms) y una intensidad de corriente de 9 kA. La temperatura y porosidad media es calculada, en cada instante de tiempo, realizando la integral de área en el dominio de la masa de polvo en cada variable involucrada. Queda definido de la siguiente forma,

$$T_m(t) = \frac{1}{A_p} \iint T(r, z, t) dA \quad (21)$$

$$\theta_m(t) = \frac{1}{A_p} \iint \theta(r, z, t) dA \quad (22)$$

donde $T_m(t)$ y $\theta_m(t)$ es la temperatura y porosidad media en el instante de tiempo " t ", respectivamente, A_p es el área del dominio (en este caso de la masa de polvo), $T(r, z, t)$ y $\theta(r, z, t)$ es la temperatura y porosidad de un punto del espacio determinado por las coordenadas " r " y " z " en el instante de tiempo " t ", respectivamente.

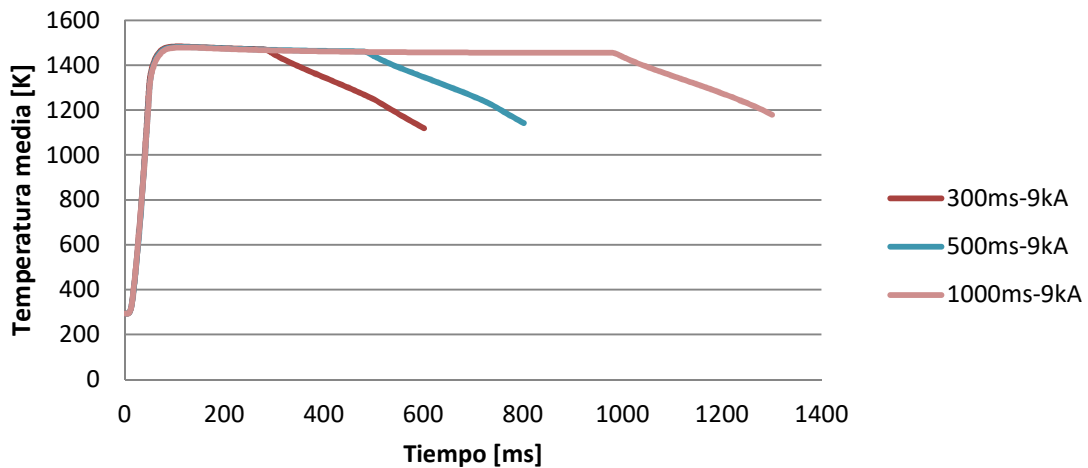


Figura 3.10. Temperatura media con diferentes tiempos de calentamiento.

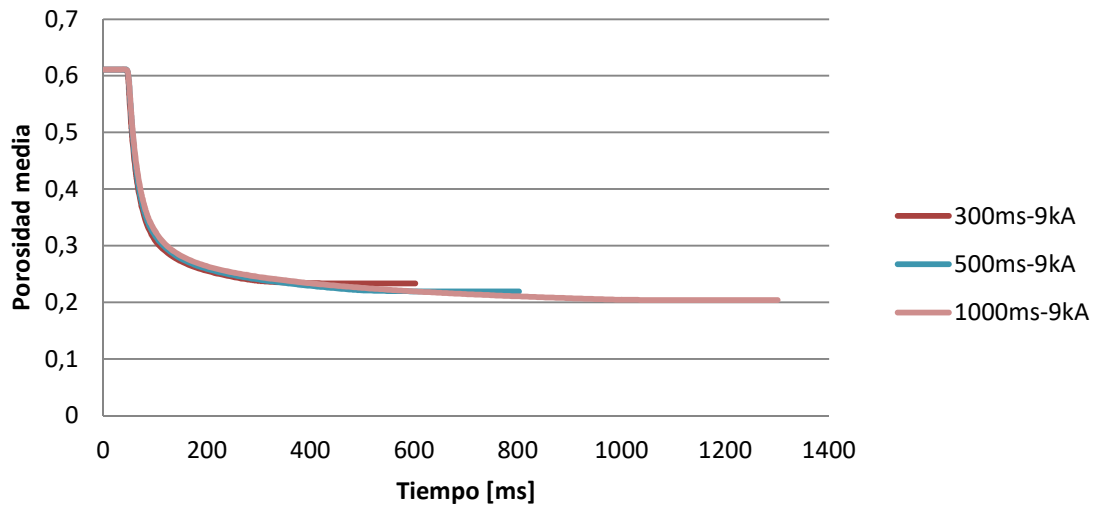


Figura 3.11. Porosidad media para diferentes tiempos de calentamiento.

Como se observa en las figuras 3.10 y 3.11 a medida que se aumenta el tiempo de calentamiento la temperatura media de la masa de polvo aumenta mientras que la porosidad disminuye.

También se observa como, aunque el tiempo de calentamiento aumente, las temperaturas más altas se mantienen prácticamente constantes haciendo por tanto, que la porosidad final no varíe significativamente.

3.5. Influencia de la intensidad de corriente

Se compara la variación de temperatura (21) y porosidad (22) media para valores de la intensidad máxima (5, 9 y 14 kA) y para un tiempo de calentamiento constante y de valor 300 ms.

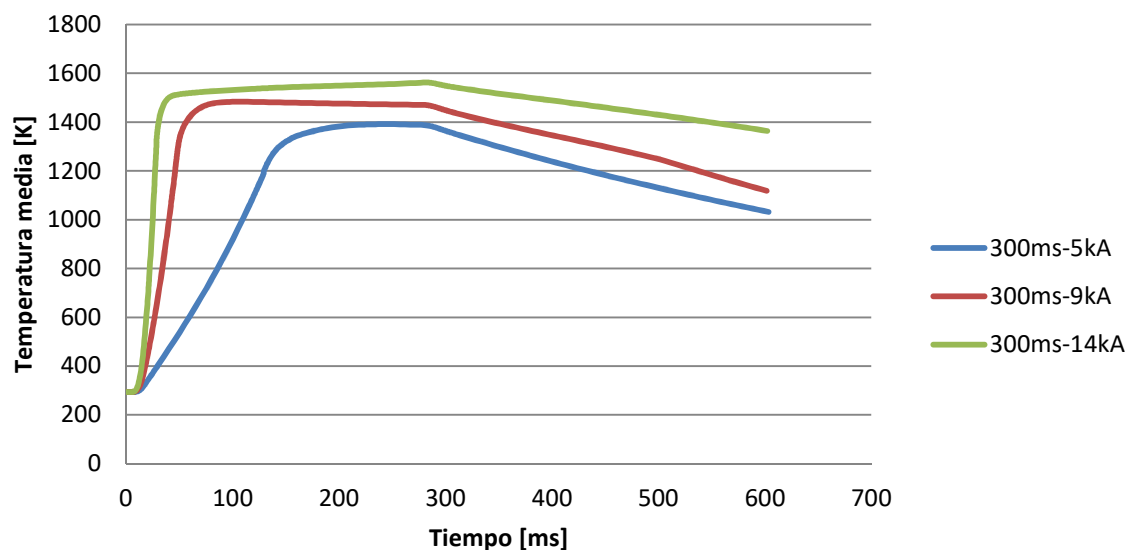


Figura 3.12. Temperatura media para diferentes valores de la intensidad de corriente.

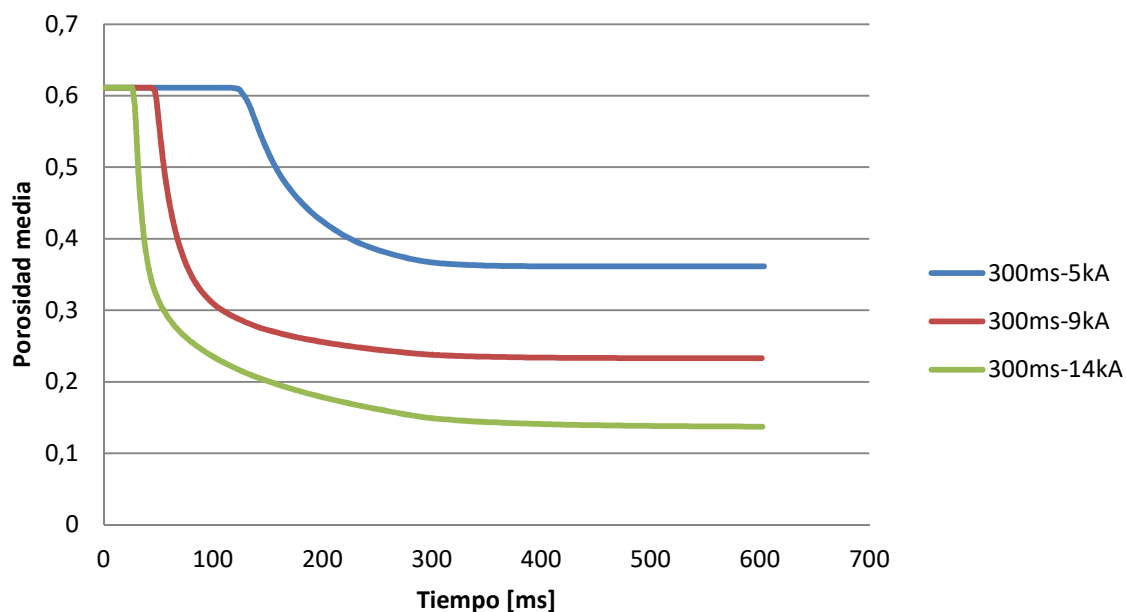


Figura 3.13. Porosidad media para diferentes valores de la intensidad de corriente.

Como se observa en las figuras 3.12 y 3.13 a mayor intensidad mayor temperatura y valores más bajos de porosidad se obtienen.

Por otro lado, es palpable como al aumentar la intensidad, el instante en el que la porosidad disminuye es inferior que en casos donde la intensidad es menor. Esto es debido a que el gradiente de temperatura aumenta para intensidades cada vez mayores llegando por tanto más rápidamente a valores más altos de temperatura.

También se observa como, al contrario que en el apartado anterior, la porosidad final si se ve fuertemente influenciada por un aumento de la corriente que circula por la masa de polvo y por tanto, en la obtención de piezas más compactadas.

3.6. Influencia de la presión

Se compara la variación de temperatura (21) y porosidad (22) media para diferentes valores de la presión aplicada (100 y 250 MPa). Esto se hace para una intensidad máxima de 9 kA y un tiempo de calentamiento de 300 ms.

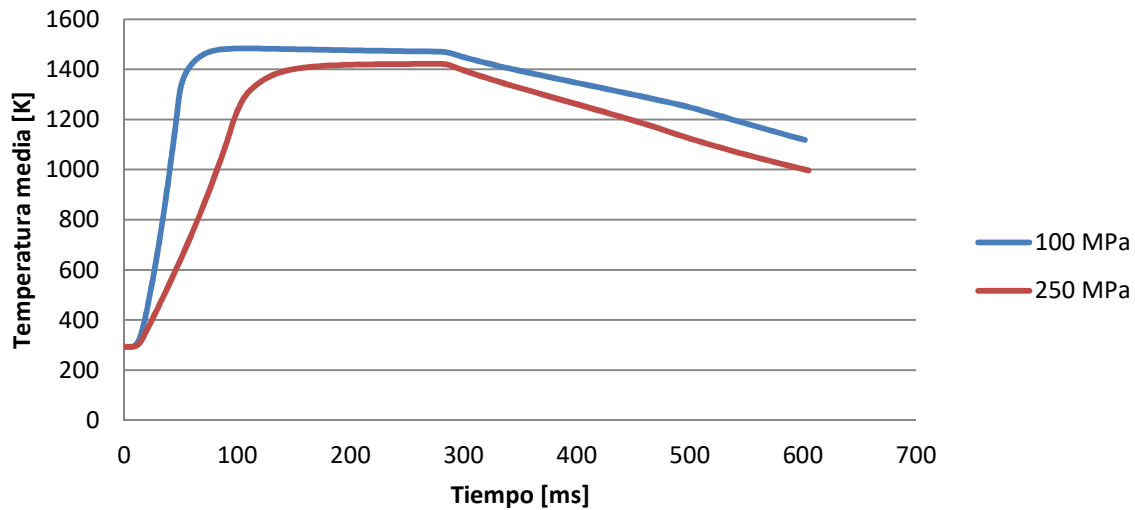


Figura 3.14. Temperatura media para diferentes valores de presión.

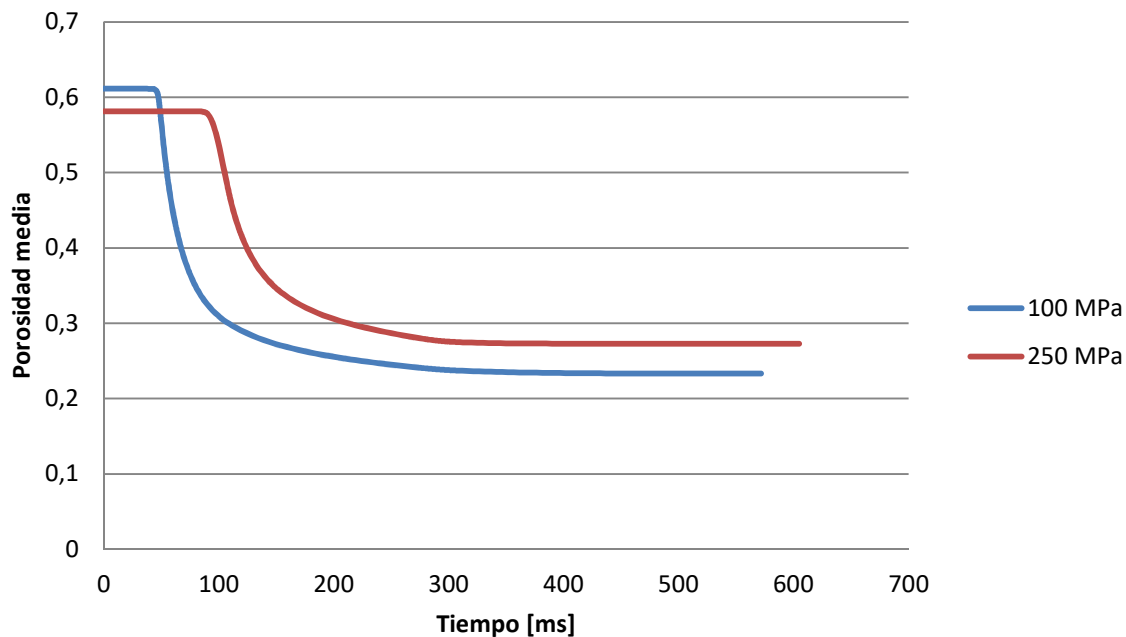


Figura 3.15. Porosidad media para diferentes valores de presión.

Como se puede observar en las figuras 3.14 y 3.15, al aumentar la presión disminuye la temperatura media de la masa de polvo debido a las propiedades que presentan este tipo de materiales y por tanto, los valores finales de porosidad obtenidos en la masa de polvo son ligeramente menores que para valores de la presión más bajas.

Por tanto, si bien es cierto que al aumentar la presión se obtiene una porosidad final en la etapa de compactación en frío menor y por tanto, una pieza más compacta. Esto dificulta de alguna manera que en el proceso de compactación en caliente la pieza llegue a porosidades inferiores que en casos con presiones más bajas. Por otro lado, con una presión más baja se consigue que los gradientes de temperaturas sean mayores haciendo por tanto más inminente el comienzo de la disminución de porosidad en el compacto.

3.7. Influencia del material del tubo cerámico

En este apartado se compara la variación de temperatura (21) y porosidad (22) media que presenta la masa de polvo al hacer uso de dos materiales distintos para el tubo cerámico que contiene el polvo. Se ensayarán alúmina y sialón. La tabla 3.2 recoge las condiciones de procesado.

Tabla 3.2. Datos de entrada modificados.

Datos	Valor
Tiempo de calentamiento	400 ms
Tiempo de enfriamiento	300 ms
Espesor del molde cilíndrico	10.5 mm
Intensidad	10.5kA
Presión	100 MPa

La evolución de la temperatura media obtenida con simulaciones para los dos materiales se muestra en la Fig. 3.16. La correspondiente evolución de la porosidad media se muestra en la Fig. 3.17.

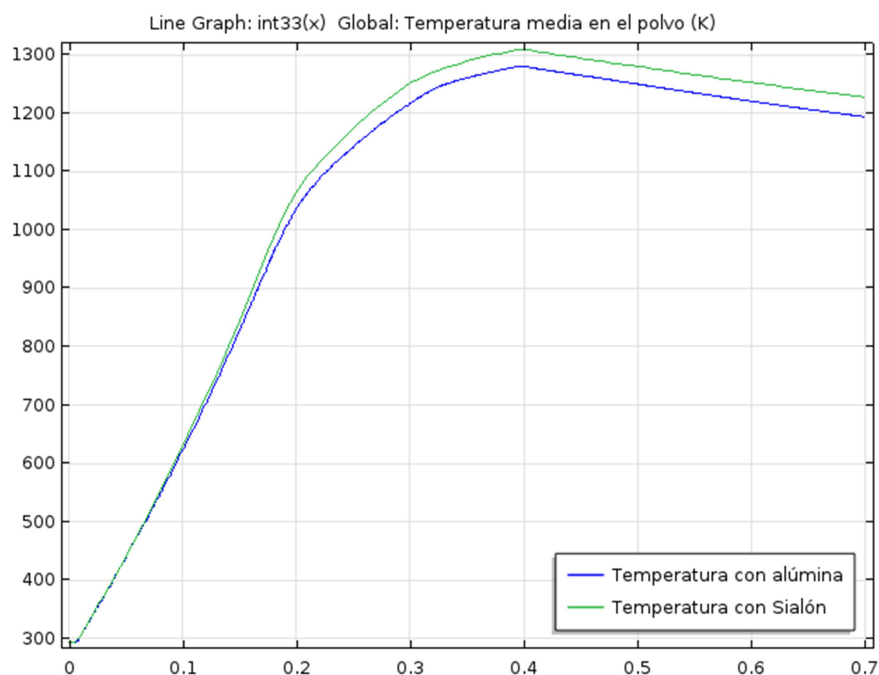


Ilustración 3.16. Temperatura media Alúmina-Sialón.

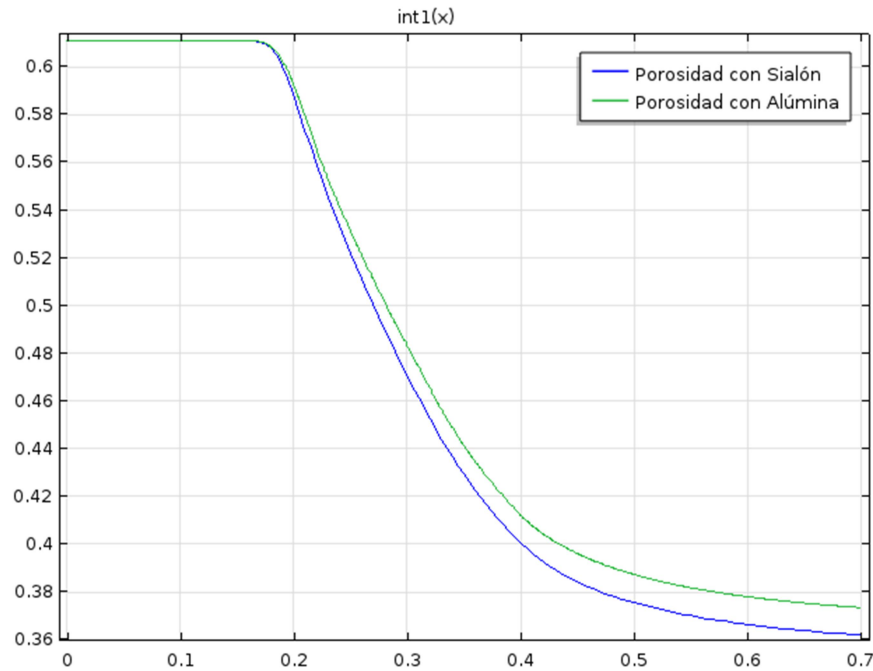


Figura 3.17. Porosidad media Alúmina-Sialón.

Se puede observar como, debido a que el sialón es menos conductor térmico que la alúmina, se producen menos pérdidas de energía térmica con el primero y, por tanto, un aumento en la temperatura (figura 3.16) de esta con su consecuente disminución de porosidad (figura 3.17). Estas diferencias son observables a temperaturas altas ya que, como se muestra en las figuras, para tiempos pequeños en donde las temperaturas aún no son suficientemente altas, no se observan grandes diferencias de porosidad y temperatura. No obstante, a medida que la temperatura aumenta, se observa como las curvas (ambas siguen la misma tendencia) se despegan una de la otra haciéndose cada vez más palpable el uso de un material u otro.

Por otro lado, la elección de un material u otro no hace variar el instante en el que la porosidad empieza a disminuir abruptamente ni tampoco el instante en el que se consigue el valor máximo de temperatura.

4 CONCLUSIONES

En el presente Trabajo Fin de Máster se ha abordado el modelado y la implementación mediante un paquete de elementos finitos llamado Comsol Multiphysics del proceso de sinterización eléctrica (S.R.E.).

El principal reto a resolver era el plantear un modelo estable y convergente que resolviera con éxito el fuerte acoplamiento mecánico-térmico-eléctrico presente en el proceso de S.R.E. El paquete de elementos finitos elegido ha demostrado ser suficientemente robusto para acometer con éxito la tarea.

Los resultados obtenidos no difieren en cantidades importantes de los resultados experimentales. De hecho estas imperfecciones en el modelo son absorbidas de alguna forma con los parámetros optimizados. Uno de los siguientes temas a estudiar es realizar las mismas simulaciones suponiendo características de los materiales más realistas.

Cabe decir que los resultados mostrados en esta memoria (temperatura y porosidad media en la masa de polvo, distribución de temperatura y porosidad en la masa de polvo) pueden ser ampliados si se tiene interés en algún otro resultado como por ejemplo (resistencia eléctrica y térmica, S.T.E, tensiones, etc. en el dominio de la masa de polvo o del sistema).

Los estudios realizados en el apartado de “Resultados y Discusión” muestran como se comportan estos resultados para diferentes condiciones que pueden darse en un proceso R.S.E ayudando de esta forma, a elegir los tiempos, intensidades y materiales óptimos para la aplicación considerada. Mencionar como el aumento del tiempo de calentamiento no es condición necesaria para obtener porosidades bajas, de hecho la elección de este parámetro no es el óptimo si se persigue una disminución significativa de porosidad. Al igual que el aumento de presión con la que se consiguen porosidades aún mayores que con presiones menores, al contrario de lo que pudiera parecer. La mejor elección para conseguir estos resultados es el aumento de corriente eléctrica y la elección de materiales para obleas y moldes lo suficientemente poco conductores del calor para así, concentrar las altas temperaturas en el interior de la masa de polvo.

Por otro lado, la geometría del polvo estudiada es muy simple (cilindro). Se han iniciado simulaciones, no incluidas en este trabajo, con moldes triangulares con similares resultados. No obstante, al ser una geometría relativamente compleja es aún más importante tener controlado los parámetros de simulación de los resolvers ya que asegurarse la convergencia es complicado y los tiempos computacionales son bastante más altos que los obtenidos suponiendo axisimetría.

En definitiva, el modelo aquí explicado es útil para estudiar y/o comparar el comportamiento de los materiales frente al proceso de sinterización por resistencia eléctrica. Para obtener resultados más precisos es importante realizar un modelo más realista con las características reales de los materiales involucrados en el sistema.

ANEXO

En este anexo se muestran las propiedades de los materiales usadas para la realización de las simulaciones. Se dividen en las piezas que componen el sistema y se muestra tanto tablas como gráficos con las propiedades para una mejor visualización.

Obleas

Tabla 5.1. Conductividad térmica de las obleas

Temperatura [K]	k[W/m.K]
250	194.2
300	188.0
350	180.8
400	172.5
500	159.0
600	149.6
800	136.9
1000	129.3
1200	122.8

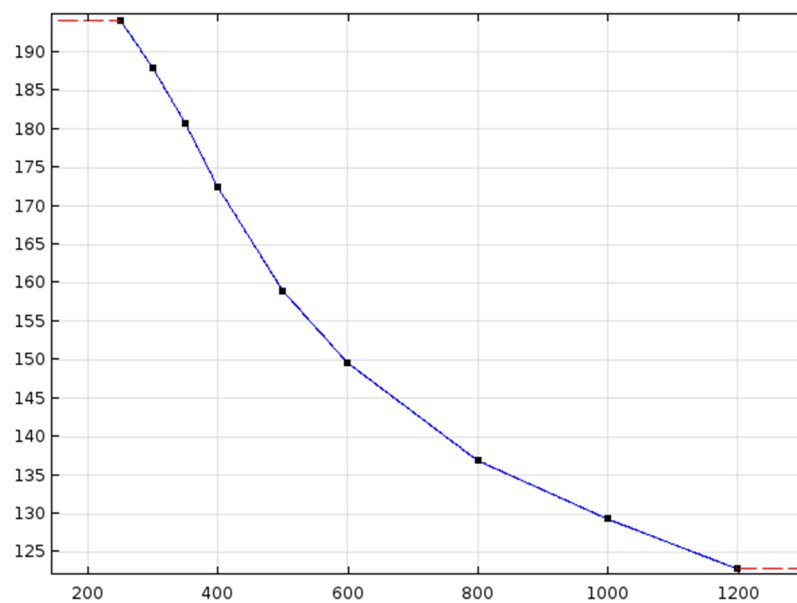


Figura 5.1. Gráfico de conductividad térmica en las obleas.

Coeficiente de expansión térmica

$$\alpha [K^{-1}] = a + bT + cT^2 + dT^3 + eT^4$$

donde

$$a = 5.682565 \cdot 10^{-7}$$

$$b = 6.306946 \cdot 10^{-8}$$

$$c = -9.757627 \cdot 10^{-11}$$

$$d = 6.862027 \cdot 10^{-14}$$

$$e = -1.748927 \cdot 10^{-17}$$

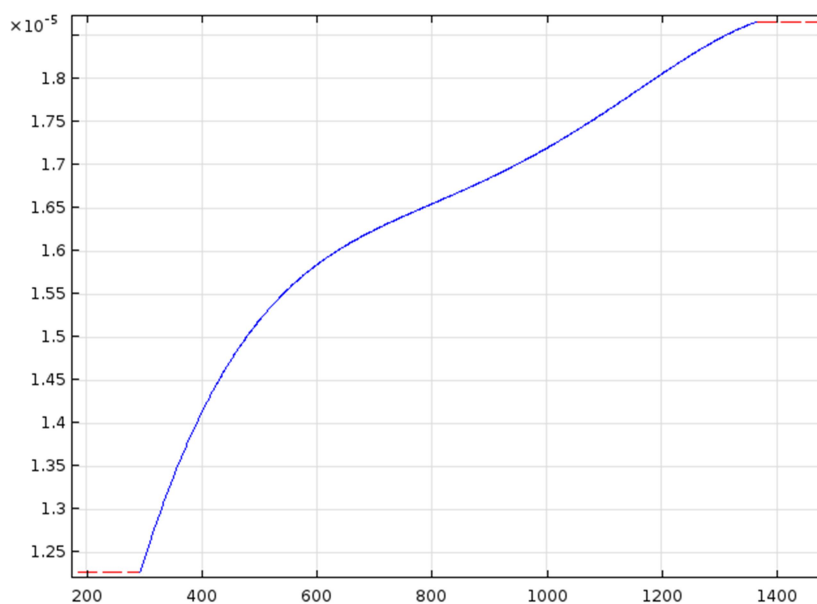


Figura 5.2. Gráfico del coeficiente de expansión térmica en las obleas.

Tabla 5.2. Tabla del calor específico de las obleas

Temperatura [K]	c[J/kg.K]
250	189.5
300	194.5
350	198.0
400	201.7
500	206.2
600	209.9
800	216.1
1000	222.8
1200	233.0

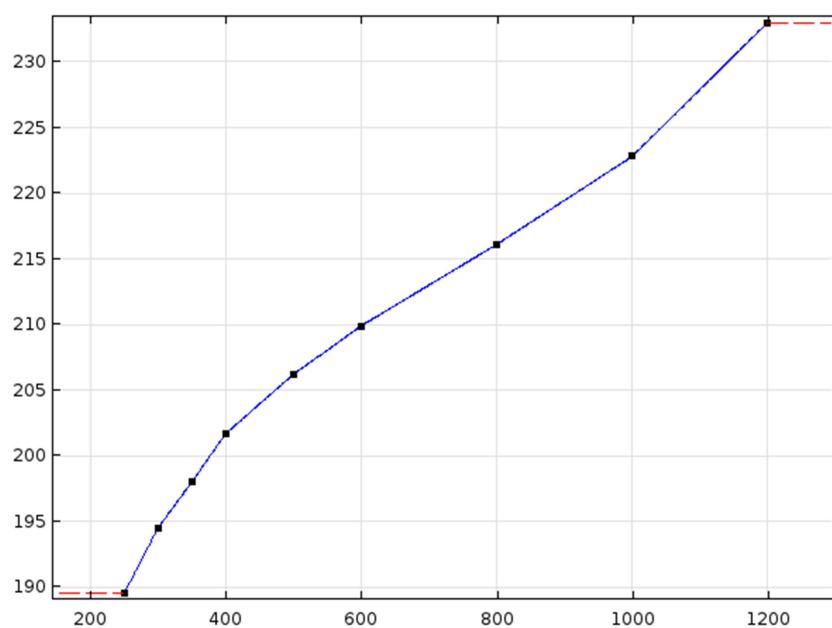


Figura 5.3. Gráfica del calor específico en las obleas.

Tabla 5.3. Tabla de resistividad eléctrica de las obleas

Temperatura [K]	Res[Ω.m]
200	2.899E-08
273	4.388E-08
293	4.805E-08
298	4.905E-08
300	4.950E-08
400	7.115E-08
500	9.350E-08
600	1.179E-07
700	1.423E-07
800	1.684E-7
900	1.945E-7
1200	2.814E-7

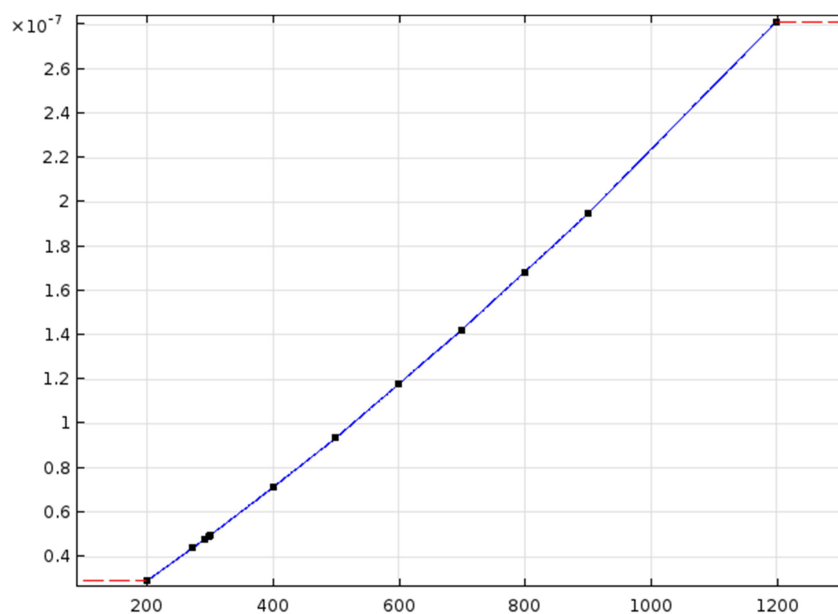


Figura 5.4. Gráfica de la resistividad eléctrica de las obleas.

Tabla 5.4. Tabla de la densidad de las obleas

Temperatura [K]	D[kg/m ³]
290	10299
373	10311
473	10326
573	10340
673	10355
773	10369
873	10383
973	10398
1073	10412
1173	10427
1273	10441
1373	10456
1473	10471
1573	10485

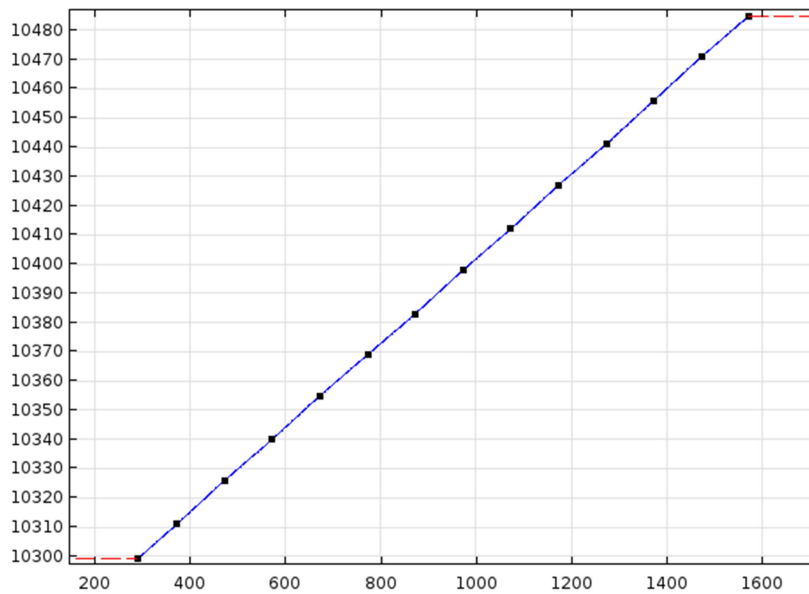


Figura 5.5. Gráfica de la densidad de las obleas.

Módulo de Young

$$E = a + bT + cT^2 + dT^3$$

donde

$$a = 2.092662 \cdot 10^{11},$$

$$b = -1.166588 \cdot 10^8,$$

$$c = 172116.1,$$

$$d = -116.639$$

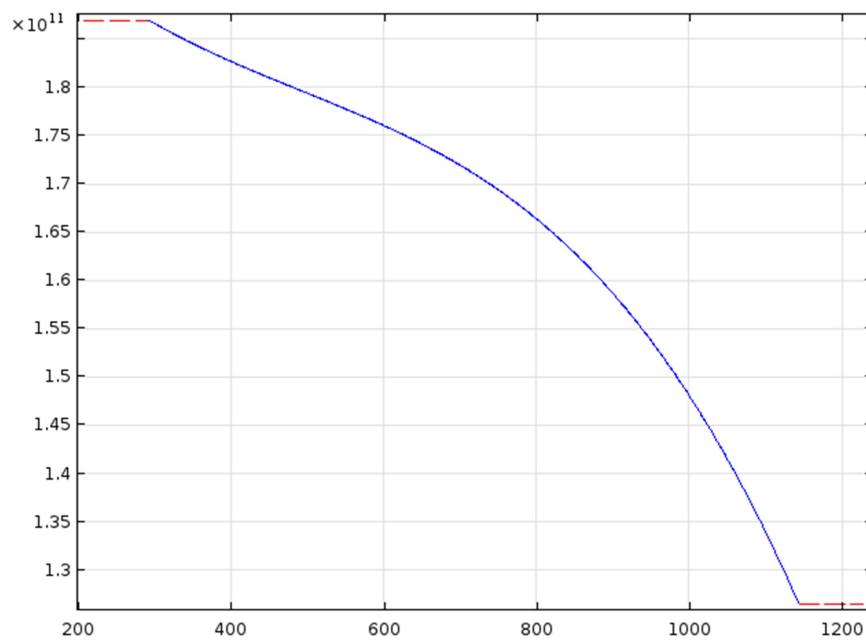


Figura 5.6. Gráfica del módulo de Young en las obleas.

Coeficiente de Poisson definido como 0.33

Punzones

Tabla 5.5. Tabla de conductividad térmica de los punzones.

Temperatura [K]	k[W/m.K]
250	406
300	401
350	396
400	393
500	386
600	379
800	366
1000	352
1200	339

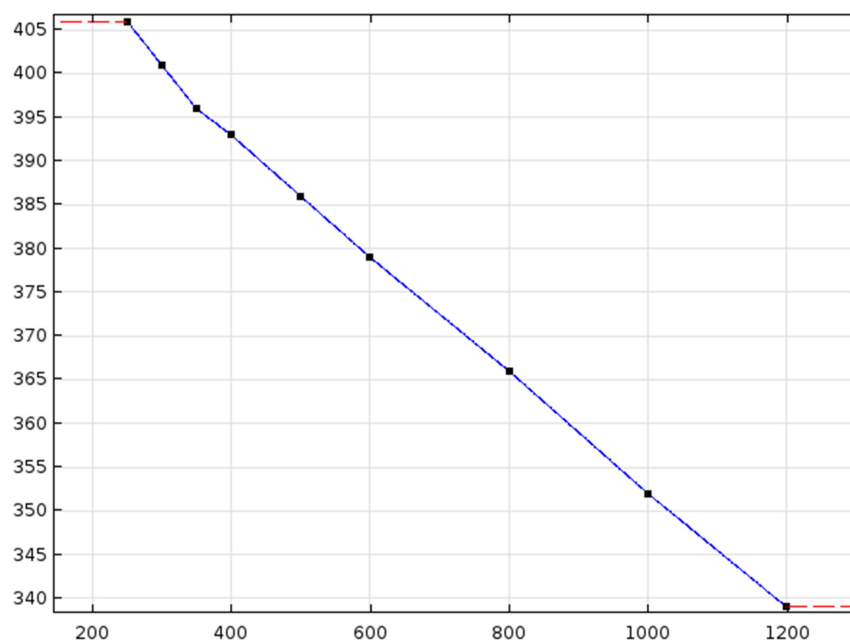


Figura 5.7. Gráfica de la conductividad térmica en los punzones.

Coeficiente de dilatación térmica $17 \cdot 10^{-6} [1/K]$

Tabla 5.6. Tabla de calor específico de los punzones.

Temperatura [K]	c[J/kg.K]
250	374
300	385
350	393
400	399
500	408
600	417
800	433
1000	451
1200	480

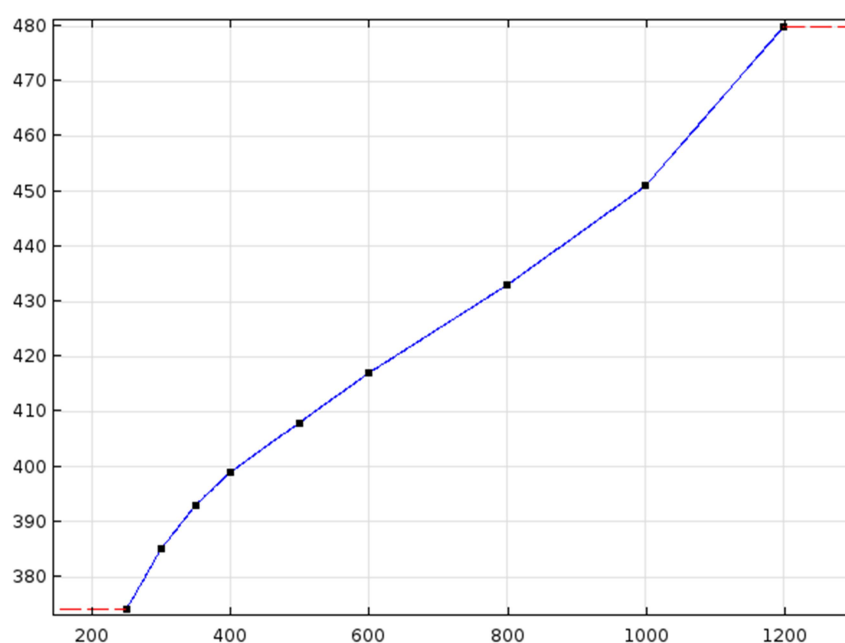


Figura. 5.8. Gráfica del calor específico en los punzones.

Tabla 5.7. Tabla de la resistividad eléctrica de los punzones.

Temperatura [K]	Res[Ω.m]
200	1.05E-08
273	1.54E-08
293	1.68E-08
298	1.71E-08
300	1.73E-08
400	2.40E-08
500	3.09E-08
600	3.79E-08
700	4.51E-08
800	5.26E-08
900	6.04E-08
1200	9.50E-08

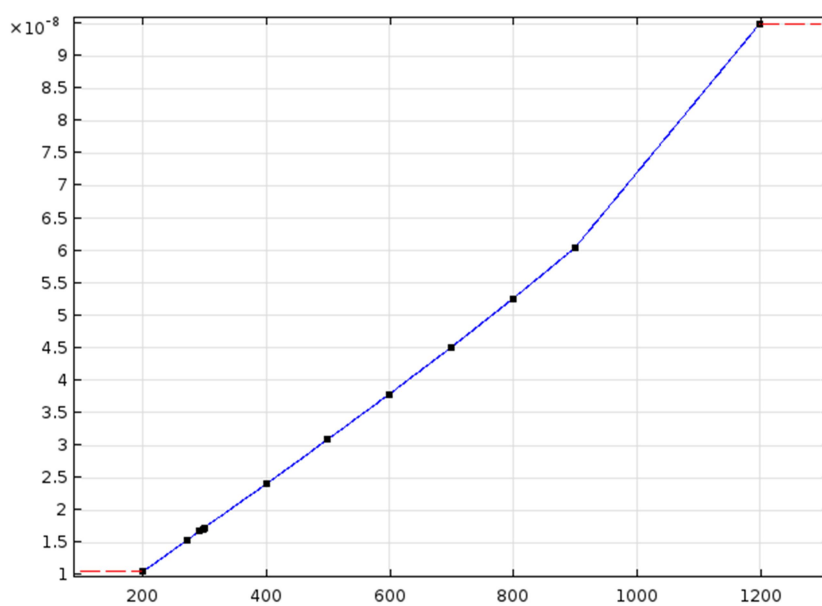


Figura 5.9. Gráfica de la resistividad eléctrica de los punzones.

Tabla 5.8. Tabla de densidad de los punzones.

Temperatura [K]	D[kg/m ³]
290	8933.00
373	8945.61
473	8960.83
573	8976.08
673	8991.35
773	9006.65
873	9021.98
973	9037.33
1073	9052.70
1173	9068.10
1273	9083.53
1373	9098.99
1473	9114.47
1573	9129.98

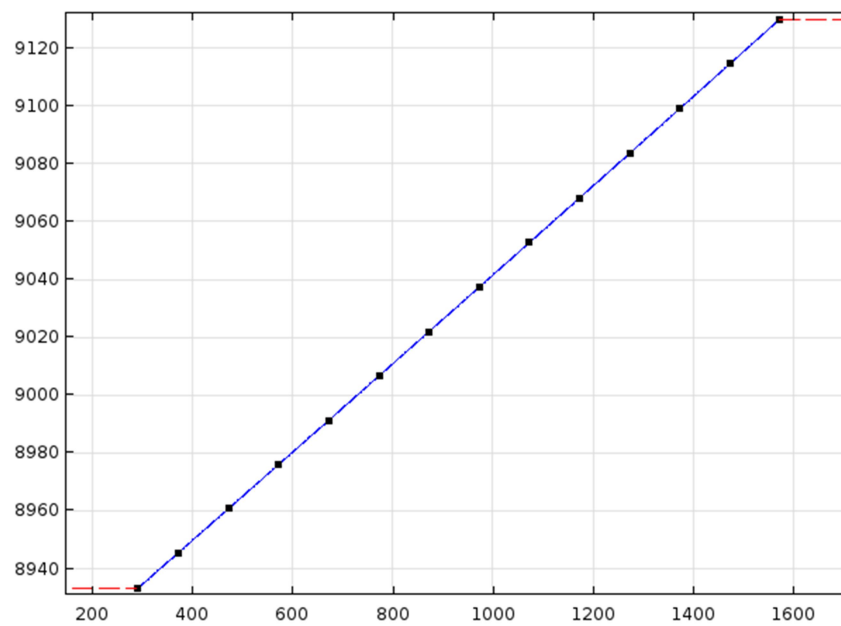


Figura 5.10. Gráfica de la densidad de los punzones.

Módulo de Young 110E9 Pa

Coefficiente de Poisson 0.35

Tabla 5.9. Tabla de conductividad térmica de la alúmina.

Temperatura [K]	k[W/m.K]
293	39
873	9.2
1673	5.9
2073	7.1
2773	10

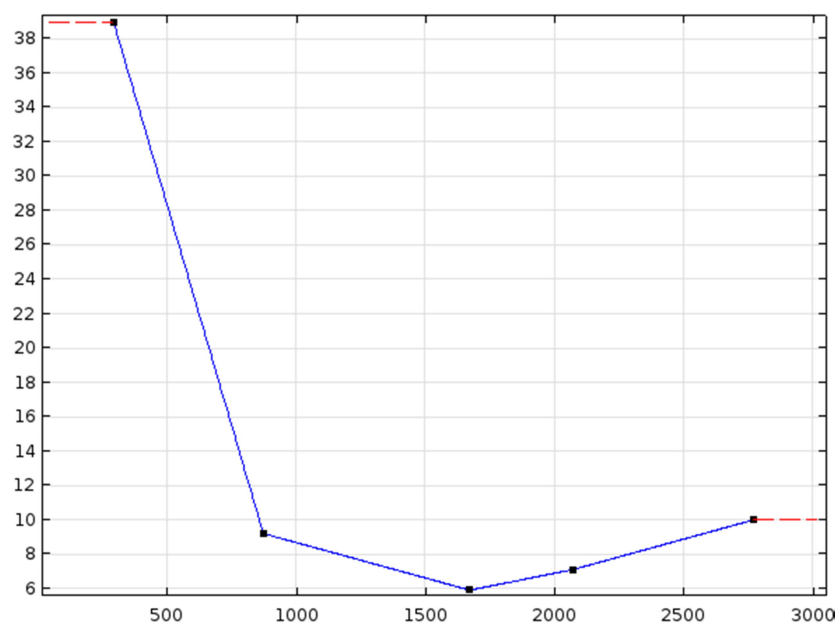


Figura 5.11. Gráfica de la conductividad térmica de la alúmina.

Coeficiente de dilatación térmica $8E-6$ [1/K]

Calor específico

$$c = A * (a + b * T + c * T^{-2})$$

donde

$$A = 41,$$

$$a = 25.48,$$

$$b = 0.00425,$$

$$c = -682000,$$

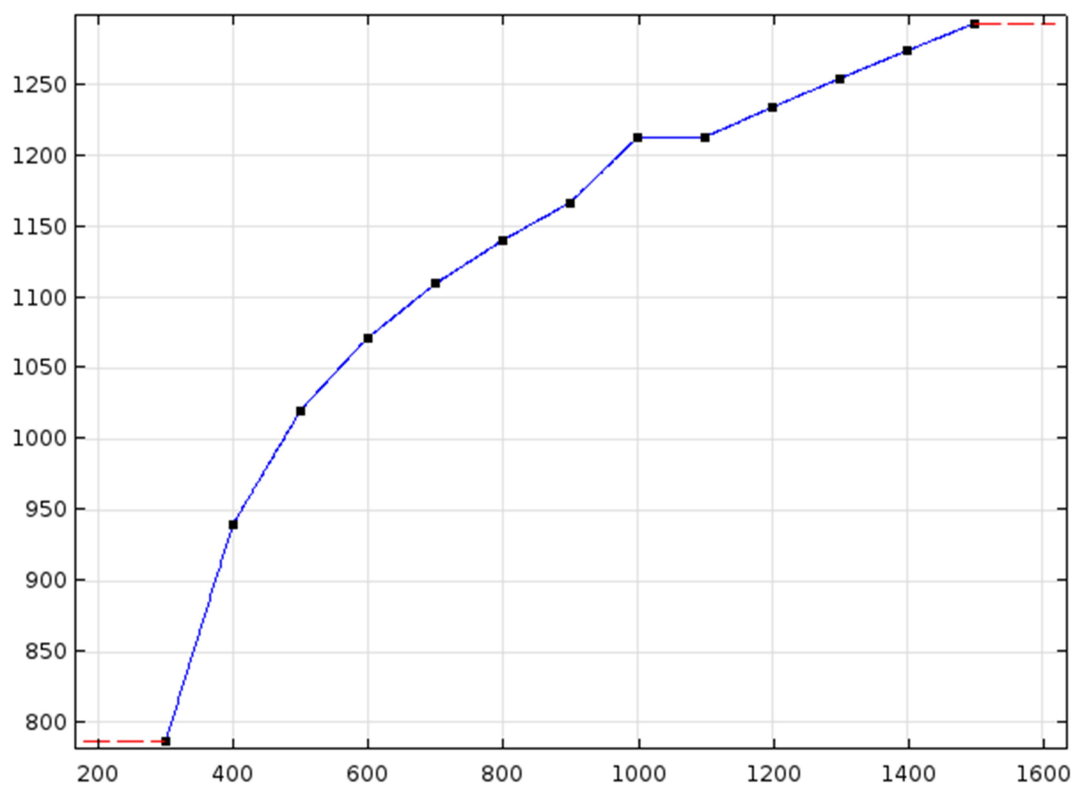


Figura 5.12. Gráfica del calor específico de la alúmina.

Conductividad eléctrica $1E-10$ (S/m)

Densidad 3900 kg/m^3

Módulo de Young $300E9 \text{ Pa}$

Coeficiente de Poisson 0.222

Aro metálico

Conductividad térmica

$$k = a + b * T \text{ [W/m. K]}; \text{ if } 255\text{K} < T < 773\text{K}$$

Where,

$$a = 25.2475$$

$$b = 0.005294736$$

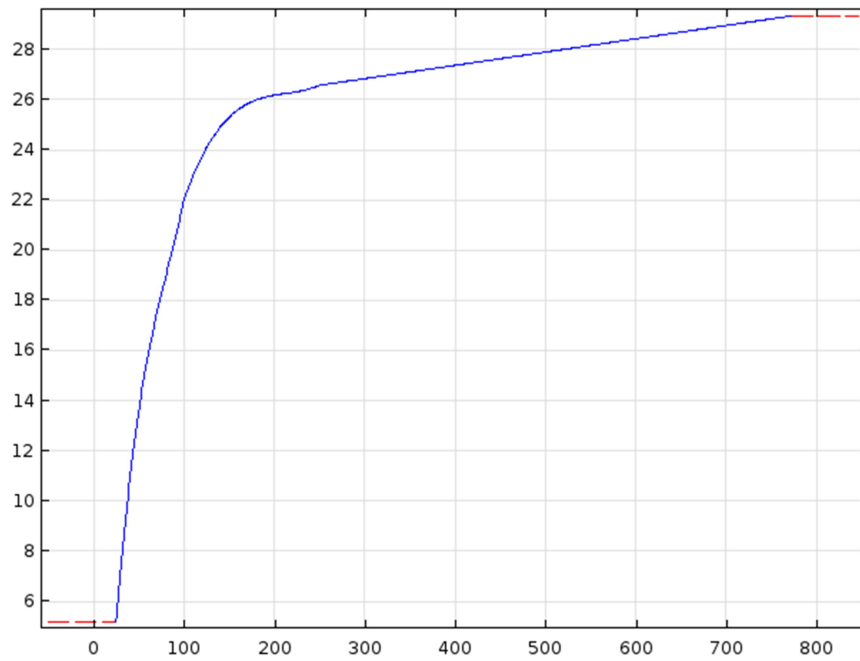


Ilustración 5.13. Gráfica de la conductividad térmica del aro metálico.

Coefficiente de dilatación térmica

$$\alpha[K^{-1}] = a + bT + cT^2 + dT^3 + eT^4; \text{ if } 20\text{K} < T < 921\text{K}$$

Where

$$a = 5.930321 * 10^{-6},$$

$$b = 2.802308 * 10^{-8},$$

$$c = -5.650723 * 10^{-11},$$

$$d = 5.290395 * 10^{-14},$$

$$e = -1.8600061 * 10^{-17}$$

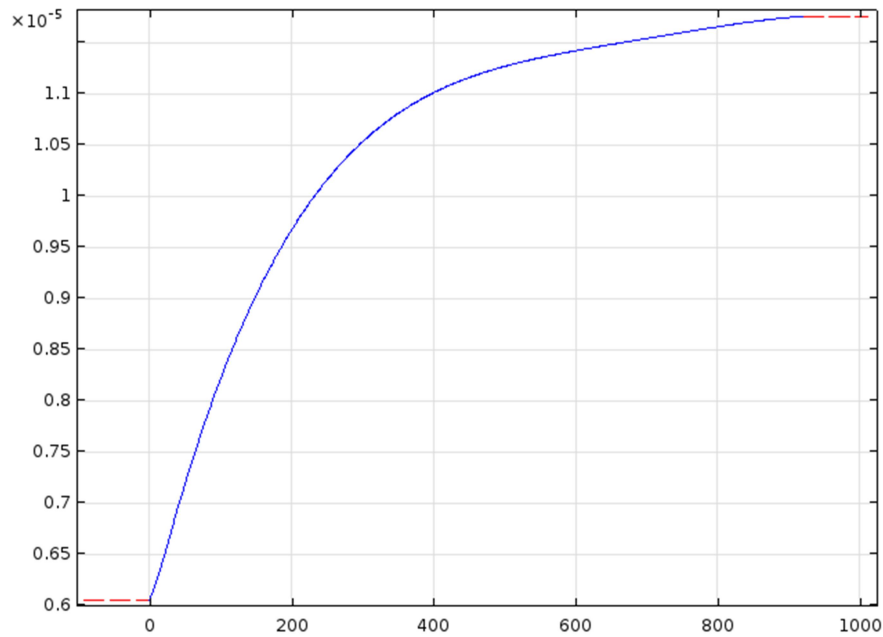


Figura 5.14. Gráfica del coeficiente de dilatación térmica del aro.

Calor específico

$$c \left[\frac{J}{Kg \cdot K} \right] = a + bT + cT^2; \text{ if } 255 < T < 1005$$

donde

$$a = 475.9087,$$

$$b = -0.2332259,$$

$$c = 6.59091 \cdot 10^{-4},$$

$$c \left[\frac{J}{Kg \cdot K} \right] = a + bT + cT^2 + dT^3 + eT^4; \text{ if } 1005 < T < 1116$$

donde

$$a = -1.438172 \cdot 10^7,$$

$$b = 53613.9,$$

$$c = -74.85657,$$

$$d = 0.04639642,$$

$$e = 1.07711 \cdot 10^{-5}$$

$$c \left[\frac{J}{Kg \cdot K} \right] = a + bT + cT^2; \text{ if } 1116 < T < 1200$$

donde

$$a = -71009.38,$$

$$b = 125.4066,$$

$$c = -0.05473141$$

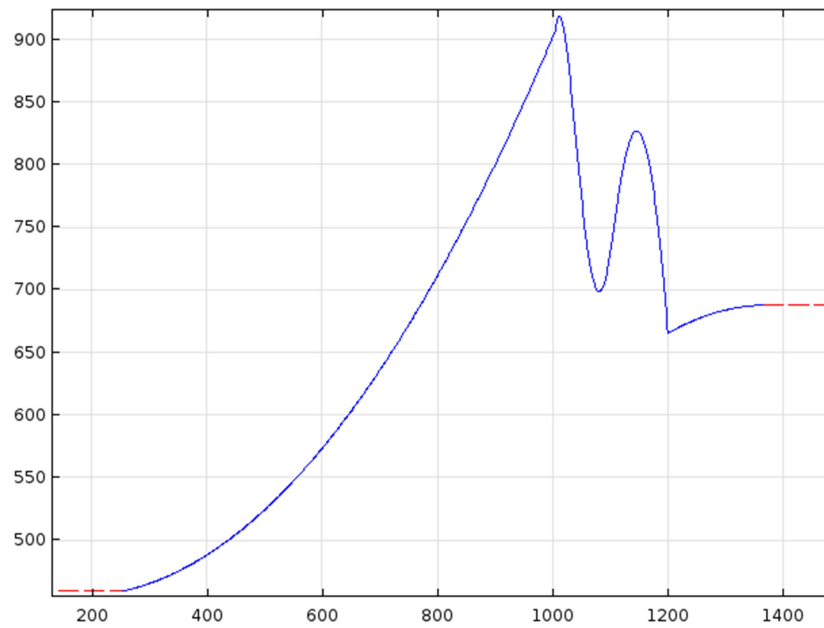


Figura 5.15. Gráfica del calor específico del aro.

Conductividad eléctrica

$$\sigma[S * m] = \frac{1}{a + bT + cT^2}; \text{ if } 77 < T < 973$$

donde

$$a = 3.284466 * 10^{-7},$$

$$b = 8.726364 * 10^{-10},$$

$$c = -6.495199 * 10^{-1}$$

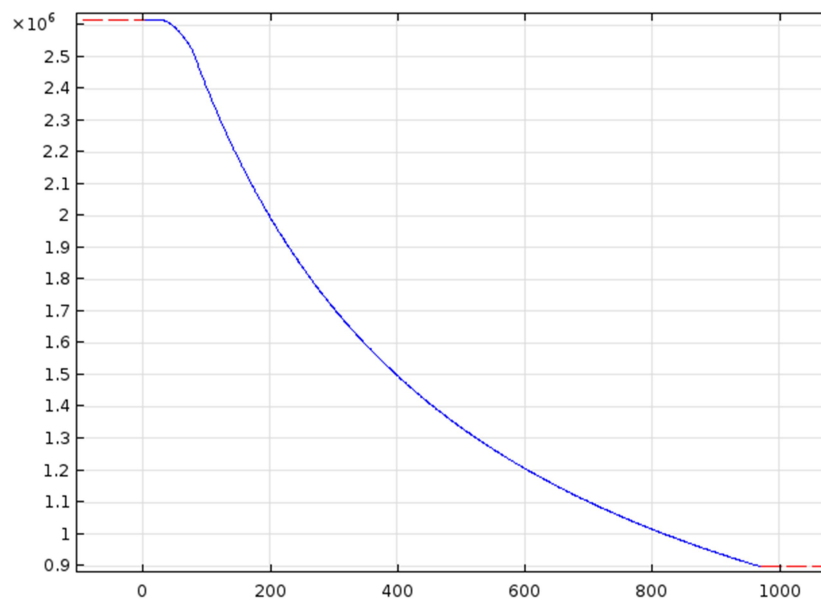


Figura 5.16. Gráfica de la conductividad eléctrica del aro.

Densidad

$$D \left[\frac{kg}{m^3} \right] = a + bT + cT^2 + dT^3 + eT^4 + dfT^5; \text{ if } 20 < T < 921$$

donde

$$a = 7689.941,$$

$$b = 0.0550138,$$

$$c = -0.001051382,$$

$$d = +1.7459 * 10^{-6},$$

$$e = -1.460243 * 10^{-9},$$

$$f = 4.84226 * 10^{-13}$$

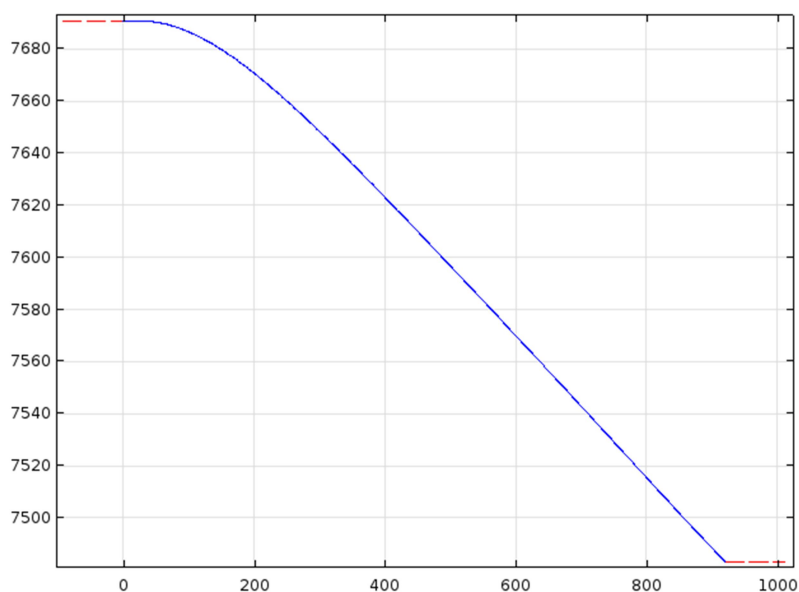


Figura 5.17. Gráfica de la densidad del aro.

Módulo de Young

$$E[Pa] = a + bT + cT^2 + dT^3 + eT^4 + fT^5; \text{ if } 20 < T < 293$$

donde

$$a = 2.192748 * 10^{11},$$

$$b = -3.992256 * 10^7,$$

$$c = 465394.5,$$

$$d = -2049.499,$$

$$e = 2.239098,$$

$$f = 1.059059 * 10^{-4}$$

$$E[Pa] = a + bT + cT^2; \text{ si } 293 < T < 1173$$

donde

$$a = 2.263948 * 10^{11},$$

$$b = -3.264378 * 10^7,$$

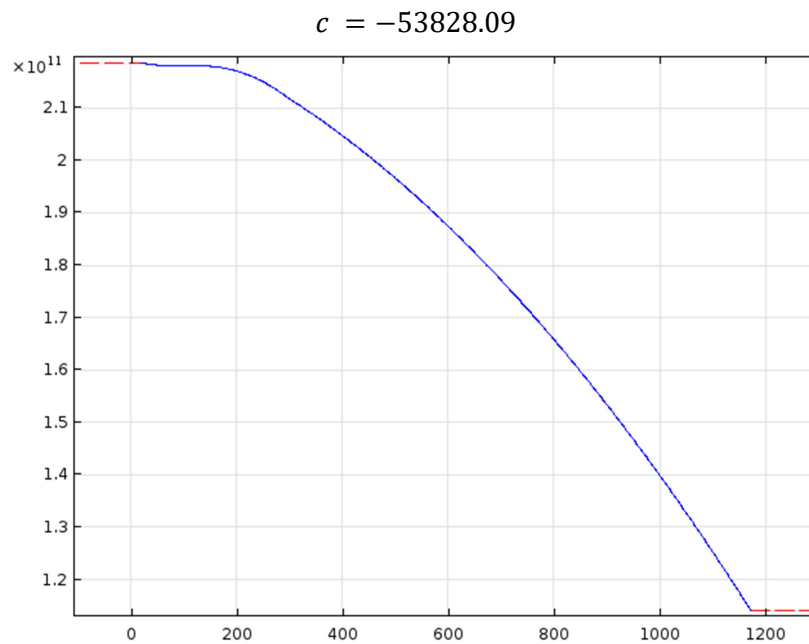


Figura 5.18. Gráfica del módulo de Young del aro.

Coefficiente de Poisson

$$v = a + b \quad ; \text{ si } 293 < T < 1173$$

Where

$$a = 0.2524185,$$

$$b = 1.215255 * 10^{-4}$$

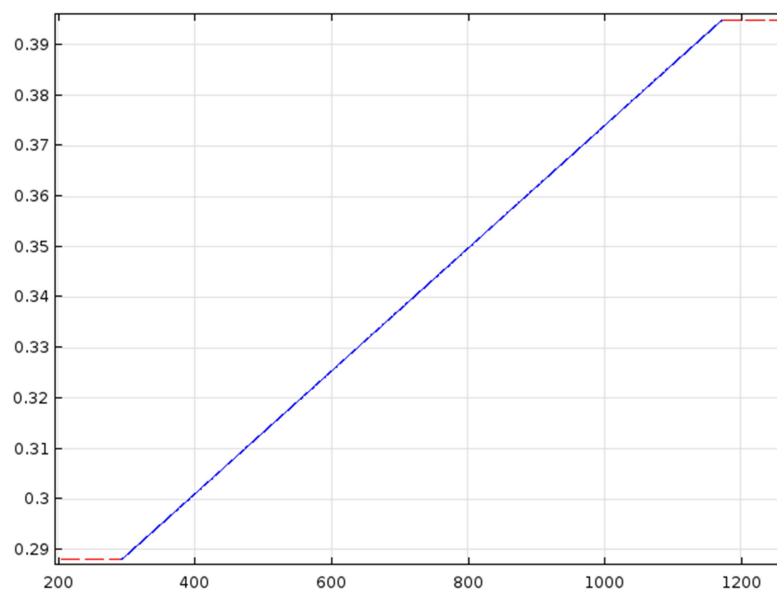


Figura 5.19. Gráfica del coeficiente de Poisson del aro.

Polvo WC6Co

Tabla 5.10. Tabla de conductividad térmica del polvo WC6Co.

Temperatura [K]	k[W/m.K]
290	42.5095606356923
300	42.5908210620381
325	42.6384875751039
350	42.6822855578352
375	42.7303298051742
400	42.7800319035266
425	42.8254398373199
450	42.8678549386472
475	42.9083681691748
500	42.9483719234471
525	42.989840372101
550	43.0356788572218
575	43.0902419036822
600	43.1525573445468
625	43.2174512438409
650	43.2836305556739
675	43.3504579565632
700	43.4175723556968
725	43.4847547247289
750	43.5518670285794
775	43.6188210409619
800	43.6855673409414
825	43.752082069347
850	43.8183639714766
875	43.8844318106366
900	43.9503204724341
925	44.0160837548851
950	44.0817934237122
975	44.1475475579522
1000	44.2139605390564
1025	44.2806938018165
1050	44.3472863256098
1075	44.4135753620882
1100	44.4795357607104
1125	44.5452381086481
1150	44.6108526638518
1175	44.6766766814217
1200	44.7432077944756
1225	44.8112933279671
1250	44.8824991680119
1275	44.9601937087591
1300	45.0490311587079
1325	45.1479429407346
1350	45.2549171614648
1375	45.3682710158761
1400	45.4865608897224
1425	45.6085223658212
1450	45.733023162232

1475	45.8590297996469
1500	45.9855775191105
1525	46.1117478699952
1550	46.2366449237475
1575	46.3593721763225
1600	46.4790092356032
1625	46.5945748786925
1650	46.7049786124244
1675	46.8089445401731
1700	46.904860545987
1725	46.9904748284287
1750	47.0621362060618
1775	47.1123574247536
1800	47.1412985787769
1825	47.1563652217928
1850	47.1582273162881
1875	47.1471686985353
1900	47.1232201144812
1925	47.0862252068276
1950	47.0358964081778
1975	46.9719128079118
1999	46.8981849553903

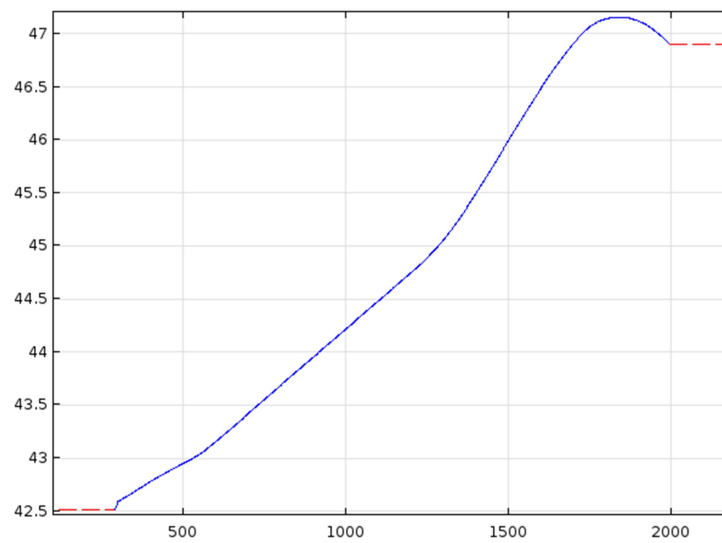


Figura 5.20. Gráfica de la conductividad térmica del polvo WC6Co.

Calor específico

El calor específico es definido como una composición del calor latente y del calor específico

$$CapHeat = CaloEsp + CalLat1 * PulGau(T, TempF1) + CalLat2 * PulGau(T, TempF2) + CalLat3 * PulGau(T, TempF3) + CalLat4 * PulGau(T, TempF4)$$

CalLati and TempFi son constants y son definidos en la siguiente tabla

Tabla 5.11. Tabla de calores latentes del polvo WC6Co.

CalLat i [J/kg.K]	TempFi [K]
740	21
1410	405
1587	267430
1787	15773

PulGau es una función definida como sigue,

$$PulGau(T) = \exp\left(-\frac{\left(\frac{T - TempFi}{SemiAncho}\right)^2}{SemiAncho * \pi^2}\right);$$

$$SemiAncho = 20$$

Tabla 5.12. Tabla de calor específico del polvo WC6Co.

Temperatura [K]	CaloEsp[J/kg*K]
290	192.539320087395
300	196.116602694538
325	204.678039587105
350	212.336490538766
375	218.398295863853
400	222.813240190925
425	226.788506495441
450	230.558205080859
475	234.184089473909
500	237.692151184933
525	241.092500195156
550	244.379475259482
575	247.504639026978
600	251.336058986404
625	255.338347927995
650	258.060919267521
675	260.141130670127
700	261.875013158584
725	263.393836325146
750	264.782257197228
775	266.091778247127
800	267.354861185246
825	268.618527635543
850	269.91970953065
875	271.292822730067
900	272.760558168873
925	274.349282240522
950	276.094554095594
975	277.98055036771
1000	279.891843067971
1025	282.071834163683
1050	284.662732524942
1075	286.358402911694
1100	287.519647571291
1125	288.415275190163

1150	289.237021112139
1175	290.144432443318
1200	291.335910579506
1225	293.280203064184
1250	296.033012574909
1275	297.832343215758
1300	299.516522678298
1325	301.232201173391
1350	302.923988043737
1375	304.554198148635
1400	306.08218412816
1425	307.447898929534
1450	308.535244415099
1475	298.135340607764
1500	297.742662072935
1525	297.828318080039
1550	298.081935955196
1575	298.430186078481
1600	298.840943737123
1625	299.296672813061
1650	299.786530286555
1675	300.303209925912
1700	300.841472557909
1725	301.397366333673
1750	301.967776453078
1775	302.550141094575
1800	303.142238537765
1825	303.74205099858
1850	304.347610882836
1875	304.956863044822
1900	305.56743534284
1925	306.176267438541
1950	306.778852143745
1975	307.367316141788
1999	307.902625782537

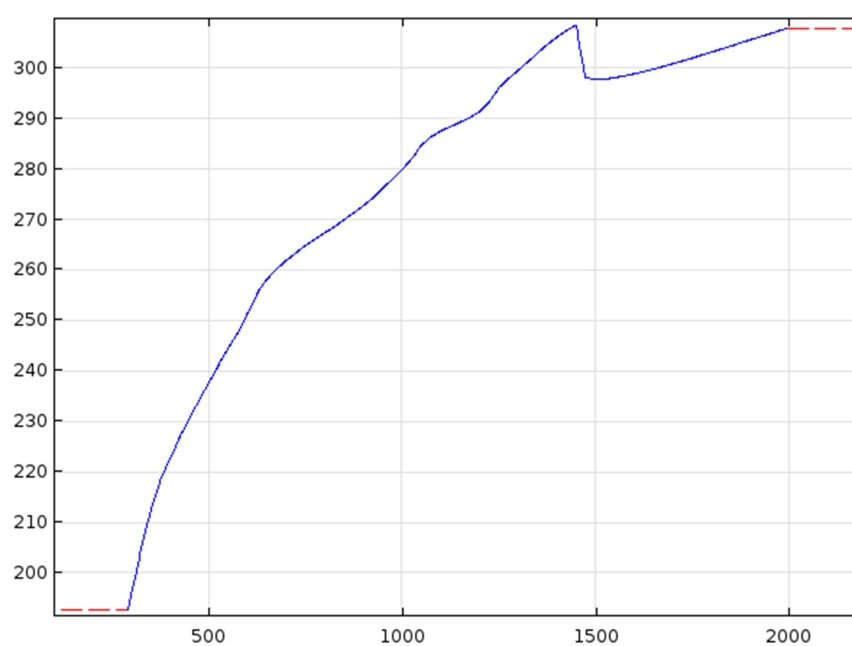


Figura 5. 21. Gráfica del calor específico sin calores latentes del polvo.

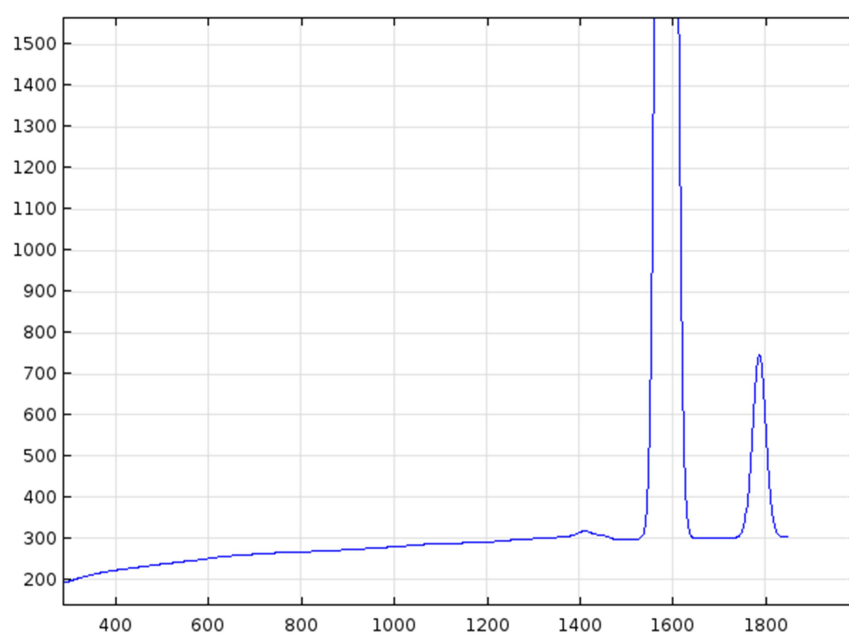


Figura 5. 22. Gráfica del calor específico con los calores latentes incorporados del polvo.

Tabla 5.13. Tabla de resistividad eléctrica del polvo WC6Co.

Temperatura [K]	Res[ohm*m]
290	2.03549844149702E-07
300	2.07154786954584E-07
325	2.1615900742302E-07
350	2.25169047884812E-07
375	2.34198399412152E-07
400	2.43235873735797E-07
425	2.52289559434036E-07
450	2.61388162411655E-07
475	2.7060349618452E-07
500	2.80036980420507E-07
525	2.89564127216216E-07
550	2.99144288169092E-07
575	3.08779790637328E-07
600	3.18547202077017E-07
625	3.28367973186949E-07
650	3.38178818748625E-07
675	3.47897496928046E-07
700	3.57378945882056E-07
725	3.66790553511536E-07
750	3.76232019250209E-07
775	3.85843275241695E-07
800	3.95792287014866E-07
825	4.05866890349577E-07
850	4.16002685448504E-07
875	4.26185426951886E-07
900	4.36460889687896E-07
925	4.4678964519679E-07
950	4.57143831353818E-07
975	4.6751634392946E-07
1000	4.77928451754511E-07
1025	4.88362396975209E-07
1050	4.98803169235909E-07
1075	5.09240429671443E-07
1100	5.1967052137016E-07
1125	5.30100614300884E-07
1150	5.40530704089995E-07
1175	5.5096082200885E-07
1200	5.61393130437746E-07
1225	5.71825765964002E-07
1250	5.82256309041451E-07
1275	5.92681114667474E-07
1300	6.03181520177791E-07
1325	6.13689703780458E-07
1350	6.2411048469738E-07
1375	6.3425451608414E-07
1400	6.4384161155601E-07
1425	6.53209441368209E-07
1450	6.62478006197729E-07
1475	6.71690158109821E-07
1500	6.81012625068872E-07
1525	6.90128931224828E-07
1550	6.98995274099592E-07

1575	7.07723583564408E-07
1600	7.16377459814951E-07
1625	7.25008620444993E-07
1650	7.33630095144574E-07
1675	7.42245672338201E-07
1700	7.50838145985944E-07
1725	7.59414262248358E-07
1750	7.67986391745348E-07
1775	7.76561291888032E-07
1800	7.8514517359267E-07
1825	7.93746494556883E-07
1850	8.02381551170344E-07
1875	8.11103518956854E-07
1900	8.2004453072823E-07
1925	8.29123272881281E-07
1950	8.38275770143129E-07
1975	8.47472244760189E-07
1999	8.56306177438964E-07

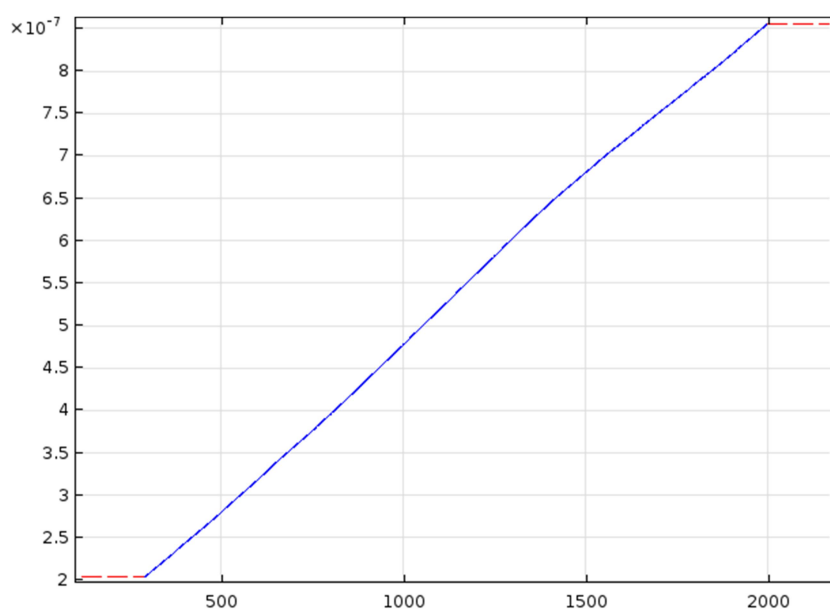


Figura 5.23. Gráfica de resistividad eléctrica del polvo.

Tabla 5.14. Tabla de densidad del polvo WC6Co.

Temperatura [K]	D [kg/m ³]
290	15098
373	15119
473	15144
573	15169
673	15195
773	15220
873	15246
973	15271
1073	15297
1173	15322
1273	15348
1373	15374
1473	15400
1573	15426

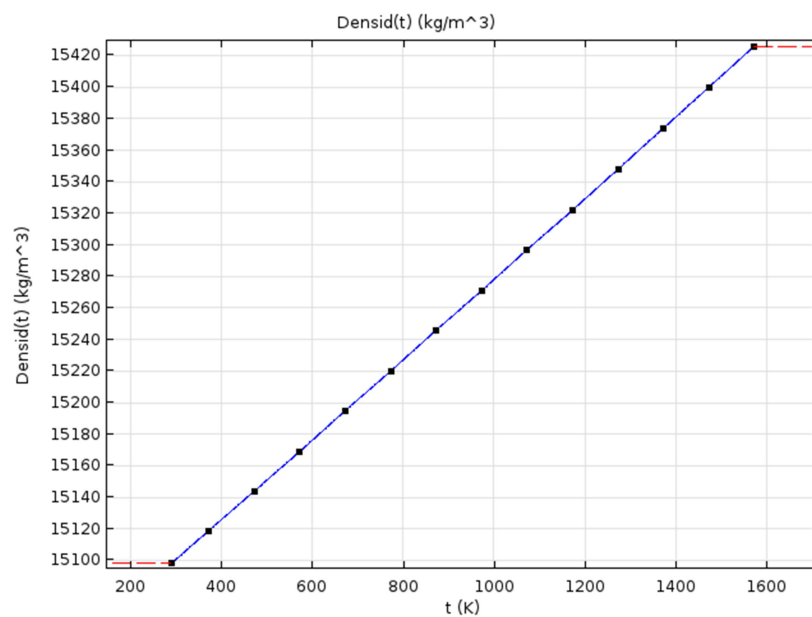


Figura 5.24. Gráfica de densidad del polvo.

Módulo de Young 505.35 GPa

Coefficiente de Poison 0.24

REFERENCIAS

- [1] Official annual report EPMA “Key Powder Metallurgy Figures” (2012).
- [2] G.F. TAYLOR, *Apparat us for Making Hard Metal Compositions*, United States Patent No. 1 896 854 (February 7, 1933).
- [3] W.D. JONES, *The Metal Industry*, 1940, I, 69-73.
- [4] G.D. CREMER, *Powder Metallurgy*, United States Patent No. 2 355 954 (August 15, 1944).
- [5] W.F. ROSS, *Method and Apparatus for Making Solid Objects from Metal Powders*, United States Patent No. 2 372 605 (March 27, 1945).
- [6] F. V. LENEL, *J. Metals*, 1955, I, 158-167.
- [7] K. INOUE, United States Patent No. 3 598 566 (August 1971).
- [8] G. DEGROAT, *American Machinist*, 1965, 109(21), 107-110; 1966, 110(23), 149-154.
- [9] R.W. BOESEL, M.I. JACOBSON and I.S. YOSHIDA, *Mater. Eng.*, 1969, 70(4), 32-37.
- [10] T. SUZUKI and S. SAITO, *J. Japan Soc. Powders And Powder Met.*, 1971, 18, 28-33.
- [11] C.G. GOETZEL and V.S. DE MARCHI, *Mod. Devel. In Powder Met.*, 1971, 4, 127-132.
- [12] S.SAITO, T. ISHIYAMA and A. SAWAOKA, *Bull. Tokyo Inst. Of Tech.*, 1974, 120, 137-142.
- [13] T.J. DAVIES and S.T.S. AL-HASSANI, *Adv. Mater. Tech. In America. ASME*, 1980, 2, 147-152.
- [14] D.J. WILLIAMS and W. JOHNSON, *Powder Met.*, 1982, 25(2), 85-88.
- [15] T. ALP, S.T.S. AL HASSANI and W. JOHNSON, *J. Eng. Mater. Tech.*, 1985, 107, 109-112.
- [16] W. JOHNSON and S. CLYENS, *Metallurgia Met. Form.*, 1977, 44, 125-130.
- [17] Z. HARA and K. AKECHI, *Titanium '80*, 1982, 2265-2274.
- [18] G.L. BURENKOV, A.I. RAICHENKO and M. SURAEVA, *Sov. Powder Metall. Met. Ceram.*, 1987, 26(9), 709-712.
- [19] O.V. SUKHOV, A.A. BAIDENKO, T.I. ISTAMINA, A.I. RAICHENKO, V. P. POPOV, A.V. SVECHKOV and M.A. GOLDBERG, *Sov. Powder Metall. Met. Ceram.*, 1987, 26(7), 530-532.
- [20] T.I. ISTOMINA, A.A. BAIDENKO, A.I. RAICHENKO, M.A. GOLDBERG and A.V. SVECHKOV, *Sov. Powder Metall. Met. Ceram.*, 1983, 22(11), 957-960.
- [21] N.F. MEDVEDENKO, M.Z. KOLCHISKII, and V.V. SKOROKHOD, *Poroshkovaya Metallurgiya*, 1977, 6, 562-565.
- [22] V.V. MESHKOV, N.K. MYSHKIN and A.I. SVIRIDENOK, *Sov. Powder Metall. Met. Ceram.*, 1984, 23(3), 200-203.
- [23] A.I. RAICHENKO, *Sov. Powder Metall. Met. Ceram.*, 1985, 24(1), 26-30.
- [24] G.L. BURENKOV, A.I. RAICHENKO, and A.M. SURAEVA, *Sov. Powder Metall. Met. Ceram.*,

- 1989, 28(3), 186-191.
- [25] J. HONG and P.W. KAO, *Mater. Sci. Eng. (A)*, 1989, 119, 153-159.
- [26] H. MORIGUCHI, K. TSUDUKI, and A. IKEGAYA, *Powder Met.*, 2000, 43(1), 17-19.
- [27] G.F. TAYLOR, *Apparatus for Making Hard Metal Compositions*, United States Patent No. 1896854 (February 7, 1933).
- [28] D.J. Williams, S. Clyens, *Metall. Met. Form* 44 ,1977, 125.
- [29] K. Okazaki, *Mater. Sci. Eng. A* 287 ,2000, 189.
- [30] <http://www.fct-systeme.de>
- [31] <http://www.shi.co.jp/english/>
- [32] <http://www.directhotpressing.com/index.php?id=3&L=1>
- [33] FANG Z, WANG X, RYU T, HWANG K.S, SOHN H.Y, *Synthesis, sintering and mechanical properties of nanocrystalline cemented tungsten carbide – a review. Int J Refract Met Hard Mat*, 2009; 27:288-299.
- [34] A.A.GRIFFITH, *The Phenomena of Rupture and Flow in Solids, Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A*, 1912, Vol.221, pp. 163-168.
- [35] Z.Z. FANG, *International Journal of refractory Metals & Hard Material* 23, 2005, pp. 119-127
- [36] F.A. DEORSOLA D. VALLAURI, G.A. ORTIGOZA VILLALBA, B. DE BENEDETTI, *Densification of ultrafine WC–12Co cermets by Pressure Assisted Fast Electric Sintering, Int. Journal of Refractory Metals & Hard Materials* 28 ,2010, 254–259.
- [37] HWAB-CHEOL KIM , IN-JIN SHON , JIN-KOOK YOON B, JUNG-MANN DOH, *Consolidation of ultra-fine WC and WC–Co hard materials by pulsed current activated sintering and its mechanical properties, International Journal of Refractory Metals & Hard Materials* 25,2007, 46–52.
- [38] MONTES, J.M., CUEVAS, F.G., CINTAS, J. ET AL. *Metall and Mat Trans A*, (2015) 46: 963. doi:10.1007/s11661-014-2643-0
- [39] J. SECONDI, *Powder Metall.*, 2002, vol. 45(3), pp. 213–217.
- [40] A.N. TIJONOV, A.A. SAMARSKI, *Ecuaciones de la Física Matemática, 2 nd ed., MIR, USSR*, 1980. (in Spanish).
- [41] R. HABERMAN, *Elementary applied partial differential equations, Prentice-Hall International, Inc, Englewood Cliffs, New Jersey*, 1987.

